



**Ana Isabel dos Santos  
Teixeira**

**Estudo do comportamento de fogos florestais com  
base no modelo FARSITE**



**Ana Isabel dos Santos  
Teixeira**

**Estudo do comportamento de fogos florestais com  
base no modelo FARSITE**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Isabel Miranda, Professora Associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e co-orientação do Doutor Jorge Humberto Amorim, Investigador em Pós-Doutoramento do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) da Universidade de Aveiro.

“As verdadeiras conquistas, as únicas de que nunca nos arrependemos, são aquelas que fazemos contra a ignorância.”

Napoleão Bonaparte

## **o júri**

Presidente

**Professor Doutor Carlos Alberto Diogo Soares Borrego**  
Professor Catedrático do Departamento de Ambiente e Ordenamento da  
Universidade de Aveiro

Vogais

**Doutor Paulo Alexandre Martins Fernandes**  
Investigador Auxiliar do Departamento Florestal da Universidade de Trás-os-Montes  
e Alto Douro

**Professor Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda**  
Professora Associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da  
Universidade de Aveiro

**Doutor Jorge Humberto de Melo Rosa Amorim**  
Investigador em Pós-Doutoramento do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar  
(CESAM) da Universidade de Aveiro.

## **agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à professora Ana Isabel Miranda, pela sua orientação, pelo apoio e pela ajuda sempre prestada.

Ao meu co-orientador, doutor Jorge Amorim, um sincero obrigado pela preciosa ajuda na realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer também à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento do projecto FUMEXP (FCOMP-01-0124-FEDER-007023).

À Vera Martins e à Daniela do GEMAC um obrigado pela disponibilidade e ajuda prestada.

A todos aqueles que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, em especial à Andreia, à Ana e à Filipa um grande obrigado pela vossa amizade.

Aos meus pais por me terem proporcionado todos estes anos de estudo, pelo carinho e apoio incondicional um muito obrigado. Também ao meu mano, que mesmo longe tem sempre uma palavra que me aquece o coração. E aos meus sobrinhos, as estrelinhas da minha vida.

E ao Joel, um sentido obrigado pela preciosa ajuda, pela paciência e compreensão nos momentos menos fáceis deste trabalho e por todo o amor e carinho. Mas acima de tudo por acreditar em mim e me fazer feliz...

**palavras-chave**

Fogo florestal, modelação da progressão de fogo, emissões atmosféricas, meios de combate

**Resumo**

O trabalho central desta dissertação consistiu na análise do comportamento de diferentes fogos florestais, recorrendo ao modelo de progressão de fogo FARSITE. Este simula a progressão de um fogo e assim calcula a área ardida, permite também testar a sua extinção através de várias técnicas de combate.

Na sequência da estimativa da área ardida, calcularam-se ainda as emissões de compostos para a atmosfera pelos fogos florestais em estudo. Estas foram determinadas tendo em consideração a eficiência de combustão, o tipo de vegetação (carga combustível), os factores de emissão relativos a cada poluente e a área ardida, em cada uma das ocorrências.

Ao longo deste trabalho procurou-se evidenciar que os incêndios florestais constituem uma fonte de emissão de compostos gasosos e particulados que afectam a saúde humana, em particular dos bombeiros, significativamente expostos no decorrer do seu combate.

**keywords**

Forest fire, fire progression modeling, atmospheric emissions, fire fighting means

**abstract**

The focus of this dissertation was to examine the behavior of different forest fires, using the model of fire progression FARSITE.

The FARSITE simulates the progression of a fire and calculates the burned area; it also allows testing the efficiency of fighting techniques.

The burned estimated area is the base for the calculation of forest fire emission to the atmosphere. Therefore emissions of pollutants during forest fires were determined using the combustion efficiency, the type of vegetation (fuel load), the emission factors for each pollutant and the area burned in each fire event.

This work highlights that forest fires are a source of gaseous compounds and particles to the atmosphere, which affect human health. Firefighters are particularly affected due to their exposure to smoke along fire fighting activities.





# Índice

|  |            |
|--|------------|
| <b>Índice .....</b>  | <b>i</b>   |
| <b>Índice de Figuras .....</b>   | <b>iii</b> |
| <b>Índice de Tabelas .....</b>   | <b>v</b>   |
| <b>1 Introdução .....</b>  | <b>1</b>   |
| <b>2 Fogos florestais .....</b>  | <b>3</b>   |
| 2.1 Comportamento do fogo .....  | 4          |
| 2.2 Diferentes tipos de fogos .....                                    | 7          |
| 2.3 Emissões dos incêndios florestais .....                            | 9          |
| 2.3.1 Compostos emitidos .....   | 9          |
| 2.3.2 Cálculo das emissões .....                                       | 12         |
| 2.4 Os meios de combate aos fogos florestais .....                     | 16         |
| <b>3 Modelação da propagação do fogo .....</b>                         | <b>19</b>  |
| 3.1 Modelação do comportamento do fogo .....                           | 19         |
| 3.2 Modelo FARSITE .....   | 21         |
| <b>4 Aplicação do FARSITE .....</b>                                    | <b>25</b>  |
| 4.1 Dados de entrada .....   | 27         |
| 4.2 Análise e discussão dos resultados .....                           | 33         |
| 4.3 Simulações efectuadas com a intervenção dos meios de combate ..... | 40         |
| <b>5 Cálculo das emissões .....</b>                                    | <b>49</b>  |
| <b>5 Conclusões .....</b>  | <b>55</b>  |
| <b>Referências bibliográficas .....</b>                                | <b>57</b>  |
| <b>Anexos .....</b>  | <b>I</b>   |
| <b>Anexo A – Modelos de propagação de fogos .....</b>                  | <b>III</b> |
| <b>Anexo B – Dados de entrada do FARSITE .....</b>                     | <b>VII</b> |
| <b>Anexo C – Meios de combate aplicados no FARSITE .....</b>           | <b>XI</b>  |

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Anexo D – Resultados das emissões de diferentes poluentes .....</b> | <b>XIII</b> |
|--|-------------|

# Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 Área ardida em Portugal ao longo dos últimos anos [URL2]. .....  | 3  |
| Figura 2.2 Triângulo do fogo [URL3] e quadrado de fogo adaptado por Viegas (2006).....  | 5  |
| Figura 2.3 Influência do vento no incêndio [Cottrell, 1989].....  | 6  |
| Figura 2.4 Tipos de fogos relativamente ao meio em que se propagam [Cottrell, 1989]. ..   | 8  |
| Figura 2.5 Metodologia de cálculo de emissões de incêndios florestais.....  | 13 |
| Figura 2.6 Acções sobre os componentes do triângulo do fogo [Macedo e Sardinha, 1993b]. .....   | 17 |
| Figura 3.1 Passos a seguir para realizar uma simulação no FARSITE [URL5]. .....   | 23 |
| Figura 4.1 Local da ocorrência dos incêndios. ....  | 25 |
| Figura 4.2 Humidade do ar (a), temperatura do ar (b) e velocidade do vento (c) e direcção do vento (d) medidos no período em que ocorreu o incêndio de Ribeira de Frades, no dia 17-08-2008. ....                     | 29 |
| Figura 4.3 Humidade do ar (a), temperatura do ar (b) e velocidade do vento (c) e direcção do vento (d) medidos no período em que ocorreu o incêndio de Portela do Casal Novo, no dia 15-07-2009. ....                 | 30 |
| Figura 4.4 Humidade do ar (a), temperatura do ar (b) e velocidade do vento (c) e direcção do vento (d) medidos no período em que ocorreu o incêndio de Vila Nova de Poiares, nos dias 1 e 2 de Setembro de 2009. .... | 31 |
| Figura 4.5 Progressão do incêndio de Ribeira de Frades, por hora, na área simulada. ...   | 34 |
| Figura 4.6 Progressão do incêndio de Portela do Casal Novo, por hora, na área simulada. ....  | 35 |
| Figura 4.7 Progressão do incêndio de Vila Nova de Poiares, por hora, na área simulada. ....   | 36 |
| Figura 4.8 Evolução da área ardida simulada para os vários incêndios. ....  | 37 |
| Figura 4.9 Evolução do perímetro ardido simulado para os vários incêndios. ....   | 38 |
| Figura 4.10 Combustível consumido ao longo do tempo nos vários incêndios.....   | 39 |

|   |      |
|---|------|
| Figura 4.11 Progressão do incêndio de Ribeira de Frades, por hora, na área simulada, com a intervenção de meios de combate. ....                              | 41   |
| Figura 4.12 Comparação das áreas ardidas na simulação do incêndio de Ribeira de Frades, com e sem meios de combate.....                                       | 42   |
| Figura 4.13 Progressão do incêndio de Portela do Casal Novo, por hora, na área simulada, com a intervenção de meios de combate. ....                          | 43   |
| Figura 4.14 Comparação das áreas ardidas na simulação do incêndio de Portela do Casal Novo, com e sem meios de combate. ....                                  | 44   |
| Figura 4.15 Progressão do incêndio, por hora, na área simulada, com a intervenção de meios de combate. ....   | 45   |
| Figura 4.16 Comparação das áreas ardidas na simulação do incêndio de Vila Nova de Poiares, com e sem meios de combate.....                                    | 46   |
| Figura 5.1 Emissões de CO <sub>2</sub> (a), CO (b) e PM10 (c) estimadas nos três incêndios. ....  | 50   |
| Figura 5.2 Emissões de CO estimadas no incêndio de Ribeira de Frades (a), Portela do Casal Novo (b) e Vila Nova de Poiares (b) e área ardida por hora. ....   | 52   |
| Figura 5.3 Emissões de PM10 estimadas no incêndio de Ribeira de Frades (a), Portela do Casal Novo (b) e Vila Nova de Poiares (b) e área ardida por hora. .... | 53   |
| Figura B.1 Ficheiro de entrada, elevação em Portela do Casal Novo .....   | X    |
| Figura D.1 Emissões de CH <sub>4</sub> simuladas nos três incêndios.....  | XIII |
| Figura D.2 Emissões de HCNM simuladas nos três incêndios. ....  | XIV  |
| Figura D.3 Emissões de PM <sub>2,5</sub> simuladas nos três incêndios.....  | XIV  |
| Figura D.4 Emissões de NO <sub>x</sub> simuladas nos três incêndios.....  | XV   |
| Figura D.5 Emissões de SO <sub>2</sub> simuladas nos três incêndios.....  | XV   |
| Figura D.6 Emissões de NH <sub>3</sub> simuladas nos três incêndios.....  | XVI  |

# Índice de Tabelas

|   |      |
|---|------|
| Tabela 1 Valores de carga de combustível para diferentes tipos de combustível [PNAC, 2002]. ..... | 14   |
| Tabela 2 Valores de eficiência de combustão por tipo de combustível. ....                         | 14   |
| Tabela 3 Factores de emissão médios para a floresta do sul da Europa [Miranda 2004].              | 16   |
| Tabela 4 Dados dos três incêndios ocorridos [URL2].....   | 26   |
| Tabela 5 Uso do solo e respectivo modelo de combustível para cada incêndio. ....                  | 27   |
| Tabela 6 Tabela resumo dos dados de entrada .....   | 32   |
| Tabela 7 Comparação da área ardida na simulação e na realidade.....                               | 39   |
| Tabela 8 Comparação dos resultados. ....  | 46   |
| Tabela 9 Características dos diferentes modelos de propagação de fogos.....                       | III  |
| Tabela 10a Atribuição de um modelo de combustível a cada tipo de uso de solo.....                 | VII  |
| Tabela 10b Atribuição de um modelo de combustível a cada tipo de uso de solo.....                 | VIIX |



# Abreviaturas e Símbolos

AFN – Autoridade Florestal Nacional

CH<sub>4</sub> – metano

CLC – Corine Land Cover

CO – monóxido de carbono

CO<sub>2</sub> – dióxido de carbono

COV – compostos orgânicos voláteis

FARSITE – Fire Area Simulator

FUMEXP – Exposição de bombeiros ao fumo e consequentes efeitos na saúde

HCNM – hidrocarbonetos não metânicos

N<sub>2</sub> – azoto

N<sub>2</sub>O – óxido nitroso

NH<sub>3</sub> – amoníaco

NO – monóxido de azoto

NO<sub>2</sub> – dióxido de azoto

NO<sub>x</sub> – óxidos de azoto

O<sub>3</sub> - Ozono

PAH – hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

PM<sub>2,5</sub> – Partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 2,5 µm

PM<sub>10</sub> – Partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 10 µm

S<sub>2</sub> – enxofre

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SO<sub>2</sub> – dióxido de enxofre

URL – *Uniform Resource Locator*



# 1 Introdução

O fogo é uma das principais causas das devastações que afectam a floresta, pelo que o seu combate se reveste de tanta importância como qualquer outro domínio da produção florestal [Macedo e Sardinha, 1993a].

Os incêndios florestais podem surgir devido a:

- Causas naturais, como relâmpagos e concentração de raios solares em pedaços de quartzo ou cacos de vidros em forma de lente;
- Propagação de pequenas fogueiras, feitas em acampamentos e cigarros mal apagados;
- Perda de controlo de queimadas, realizadas para “limpeza”;
- Incendiários e/ou piromaníacos.

Devido ao aumento de frequência do incêndio florestal e à magnitude dos seus efeitos nas mais diversas áreas, entre as quais o ambiente, a saúde, a economia, a segurança e o património, os fogos florestais tornaram-se uma preocupação para os governantes, gestores, operacionais, cientistas e cidadãos em geral. As razões desta preocupação são por demais evidentes: diminuição do património biológico, destruição de ecossistemas, elevados custos materiais, riscos durante as operações de combate e até perdas humanas [Carvalho, 2008].

Entre os efeitos de um fogo florestal encontra-se a libertação de compostos químicos para a atmosfera, existindo um consenso generalizado quanto à importância dos incêndios florestais como fonte de emissão de poluentes para a atmosfera. Os produtos emitidos durante um fogo florestal incluem dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), metano ( $\text{CH}_4$ ), hidrocarbonetos não-metânicos (HCNM), óxidos de azoto ( $\text{NO}_x$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e partículas (PM) [Miranda e Borrego, 2002]. Contudo, o actual estado do conhecimento acerca dos potenciais impactes dessas emissões sobre a saúde das comunidades afectadas e, em particular, do pessoal envolvido nas operações de extinção é escasso e, em alguns casos, incerto. Os obstáculos que os investigadores têm de enfrentar no decurso do processo de obtenção de dados sobre a exposição pessoal ao fumo em ensaios de campo e em condições incêndio contribuem, em grande parte, para a actual dificuldade em estabelecer relações, de causa e efeito, entre a concentração dos poluentes atmosféricos no fumo e os efeitos na saúde dos bombeiros

de curta e longa duração. Na Europa, onde em média, e de acordo com dados estatísticos oficiais, cerca de 500 000 hectares foram consumidos anualmente pelo fogo durante os últimos 25 anos, este assunto permanece, contudo, por investigar. Os únicos trabalhos desenvolvidos em território Europeu foram publicados pela Universidade de Aveiro, no âmbito de vários projectos de investigação científica, os quais envolveram a medição de emissões, qualidade do ar e exposição humana durante fogos experimentais à escala real [URL1].

Neste contexto, o projecto FUMEXP – Exposição de bombeiros ao fumo e consequentes efeitos na saúde, através da análise dos potenciais efeitos das emissões dos incêndios florestais na saúde dos bombeiros, visa preencher algumas das lacunas no actual estado do conhecimento científico nesta matéria. Para tal, compreende a realização de medições no campo, durante fogos experimentais e incêndios, da exposição pessoal de um grupo de bombeiros que foi acompanhado no decorrer de três épocas de fogos.

Esta dissertação tem como objectivo principal contribuir para os resultados do projecto FUMEXP, simulando a progressão do fogo e calculando as emissões associadas, para alguns dos incêndios estudados, usando um sistema de modelação, o FARSITE, que permitirá estabelecer uma comparação com os níveis de exposição medidos, bem como uma estimativa mais detalhada em termos de distribuição espaço-temporal.

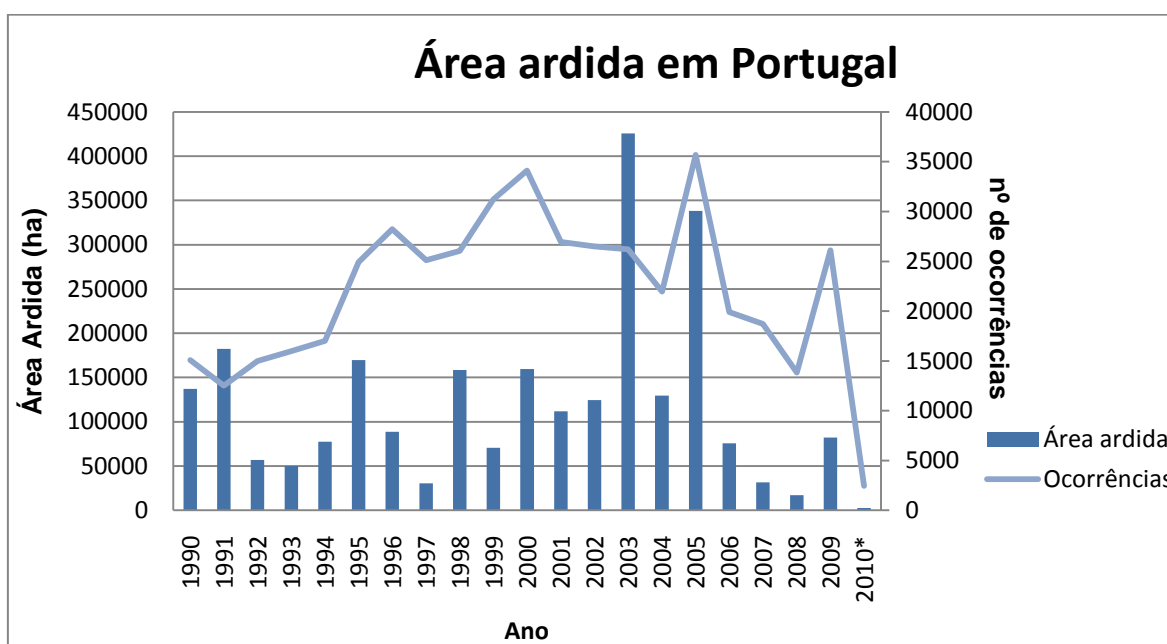
Tendo em atenção o objectivo da dissertação e, nesse âmbito, a importância do conhecimento do comportamento do fogo, no capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica que visa não só os aspectos da progressão do fogo, mas também outros factores importantes como os tipos de fogos e também os meios de combate.

O capítulo da modelação (capítulo 3) inclui uma breve caracterização de vários modelos de progressão de fogos, e a descrição mais detalhada do modelo utilizado para o estudo, o FARSITE. A aplicação do modelo a três casos de estudo e a análise dos resultados são descritos no capítulo 4. No capítulo 5 apresenta-se o cálculo das emissões dos fogos em estudo.

Finalmente, a conclusão inclui as considerações finais sobre o modelo de simulação FARSITE e o subsequente cálculo das emissões e o contributo que os seus resultados têm para o projecto FUMEXP.

## 2 Fogos florestais

Portugal tem sido fustigado nos últimos anos por incêndios florestais de proporções consideráveis, que destroem uma parte importante do património florestal do país. Para uma melhor percepção da dimensão do fenómeno dos incêndios florestais em Portugal, apresentam-se na Figura 2.1 os dados relativos à área ardida e ao número de ocorrências, entre os anos de 1990 e de 2010.



**Figura 2.1 Área ardida em Portugal ao longo dos últimos anos [URL2].**

\*Registos até ao dia 15/06/10

Em Portugal, tal como noutros países do Sul da Europa, o aumento da frequência, dimensão e intensidade de incêndios florestais nas últimas décadas, tem vindo a gerar preocupação, em particular no seio das comunidades médica e científica. Os anos de 2003 e 2005 foram particularmente críticos, ainda que por diferentes motivos. Em 2003 registaram-se valores de área ardida elevados durante os meses de Verão, enquanto que 2005 se caracterizou pelo elevado número de ocorrências.

## 2.1 Comportamento do fogo

Segundo Macedo e Sardinha (1993a), o comportamento de um fogo é o resultado da conjugação de fenómenos que podem ter grande amplitude de variação. O estudo do comportamento dos vários tipos de fogos é essencial para o seu controlo e segurança do pessoal que intervém no combate.

Para que haja um fogo é necessária a existência de combustível, o qual no caso dos incêndios florestais, é constituído pelo vasto conjunto de espécies vegetais que se encontram na floresta. De forma geral os combustíveis são consumidos rapidamente, pelo que a continuação da combustão é acompanhada da propagação a novos combustíveis adjacentes. Assim, os incêndios florestais tendem a progredir ao longo de uma linha à qual se chama frente de chamas, cujo perímetro delimita a área ardida.

A quantidade de combustível disponível no terreno é um parâmetro deveras importante, porque dele depende em última análise, a energia libertada durante a progressão do incêndio – a intensidade de progressão, e consequentemente a maior ou menor facilidade com que o incêndio poderá ser combatido e suprimido.

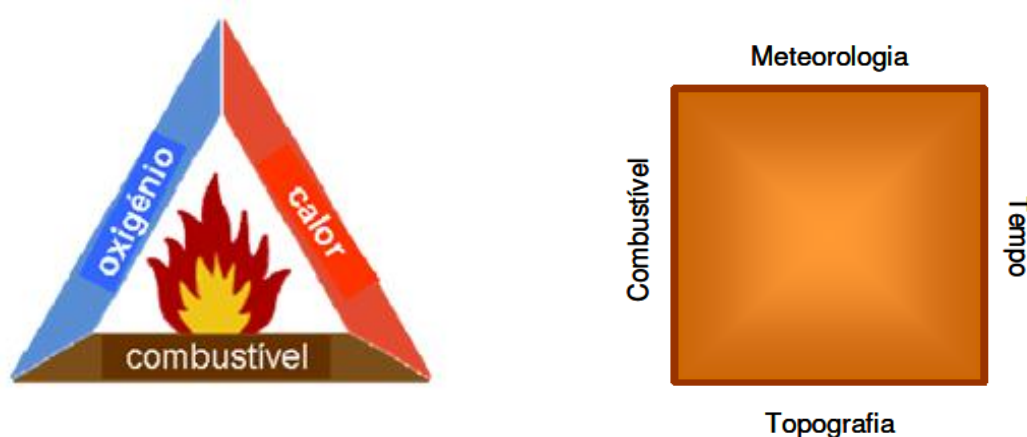
A configuração do terreno tem grande importância nas condições de eclosão, propagação e combate dos incêndios florestais. A topografia condiciona também os combustíveis e o clima. Para além das características topográficas do terreno há que atender à sua localização geográfica, nomeadamente a sua proximidade relativamente a extensões de água. O mesmo relevo, junto ao mar, terá características mais húmidas do que se estivesse situado no interior.

Uma das propriedades que mais directamente afecta a ocorrência dos incêndios é o teor de humidade da planta. O teor de humidade das plantas varia com a estação do ano, sendo em geral menor nos períodos de Verão e Outono. É também grandemente influenciada pelas condições climáticas, nomeadamente pela precipitação.

Viegas (1989) afirma que a velocidade de propagação é uma grandeza que pode variar, desde poucos metros por hora, até cinco ou mais quilómetros por hora, conforme as condições, pelo que é muito importante saber prever a velocidade de propagação de um dado incêndio. Já a intensidade de propagação é a energia calorífica libertada por unidade de tempo e por unidade de comprimento da frente. A velocidade de progressão, sendo o factor mais variável, é aquele que mais afecta a intensidade de propagação.

As condições meteorológicas variam com grande frequência, daí serem um factor tão importante na progressão dos incêndios florestais. A temperatura do ar, a humidade relativa, a precipitação, a estabilidade atmosférica e o vento são os factores meteorológicos que interferem no comportamento do fogo.

O triângulo de fogo tradicional foi adaptado por Viegas (2006) para um quadrado, este agrupa em três classes os factores condicionantes do comportamento do fogo: combustível, topografia e meteorologia. Existe um quarto factor que é normalmente ignorado, mas considerado fundamental para a descrição do comportamento do fogo, trata-se da variável tempo, a qual intervém de uma forma explícita no comportamento de um fogo, que apresenta características dinâmicas. Ou seja, mesmo com condições fronteiriça permanentes as características de propagação vão-se alterando ao longo do tempo (Figura 2.2).



**Figura 2.2 Triângulo do fogo [URL3] e quadrado de fogo adaptado por Viegas (2006)**

O vento é, por si só, o factor que mais afecta a propagação dos incêndios (figura 2.3). Pode, sem dúvida, afirmar-se que praticamente todos os grandes incêndios e situações perigosas são acompanhados de condições de vento intenso. Os parâmetros do vento velocidade e direcção, variam muito rapidamente no tempo, o que torna este factor um dos mais difíceis de determinar ou de prever [Viegas, 1989].

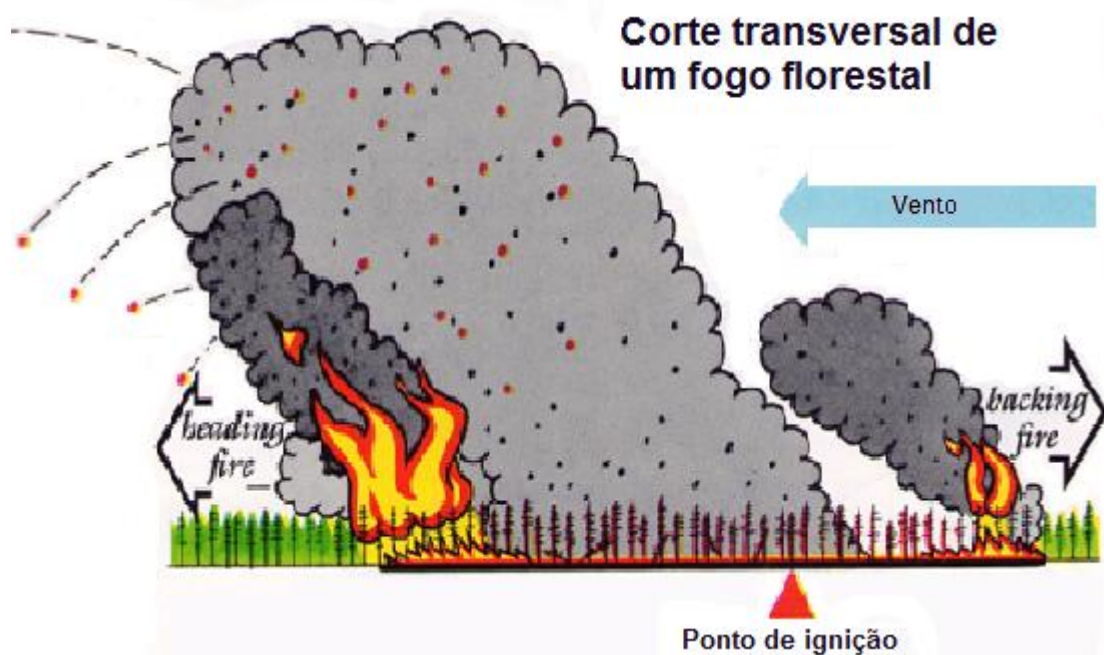


Figura 2.3 Influência do vento no incêndio [Cottrell, 1989].

Existem dois tipos de fogo os *heading fires*, cuja progressão ocorre a favor do vento, e os *backing fires*, cuja progressão ocorre no sentido contrário ao do vento. Os primeiros têm uma velocidade de propagação mais elevada, e, conseqüentemente, baixa eficiência de combustão e emissões de compostos menos oxidados. Por outro lado, os *backing fires* têm uma velocidade de propagação mais baixa e tempo de residência do fogo mais elevado, o que conduz a eficiências de combustão mais elevadas e emissão de compostos mais oxidados [Peterson & Sandberg, 1988].

Um fogo desenvolve-se essencialmente em dois estágios: a pirólise, que corresponde à decomposição química inicial a altas temperaturas, e a combustão, a reação de oxidação dos vapores pirolisados que se libertam do combustível. Estes estágios coexistem e ocorrem a taxas diferentes através do leito. Existem várias classificações para as fases de desenvolvimento de um fogo, entre as quais, a que as divide em: 1) pré-ignição e ignição; 2) flamejante; e 3) incandescente. Durante a fase de pré ignição e ignição a pirólise é dominante. Este processo, inicialmente endotérmico, passa posteriormente para uma fase de decomposição exotérmica. Ao longo do processo produz-se uma mistura gasosa combustível provocando a ignição. Na fase flamejante, na qual predomina a oxidação em meio gasoso, a temperatura aumenta rapidamente devido ao calor libertado nas reacções exotérmicas. A pirólise continua, acompanhada pela oxidação rápida e flamejante dos combustíveis gasosos libertados, em concentrações

elevadas. A fase incandescente ocorre quando os voláteis foram já expulsos do combustível celulósico, restando apenas um invólucro carbonoso. Pode acontecer, ainda, quando o teor em cinzas é elevado e o de voláteis baixo (como, por exemplo, em solos orgânicos), de modo que o aquecimento não produz misturas gasosas voláteis, ou a gravidade específica do combustível é demasiado baixa para conduzir o calor com rapidez suficiente para que se produza a mistura gasosa inflamável.

## 2.2 Diferentes tipos de fogos

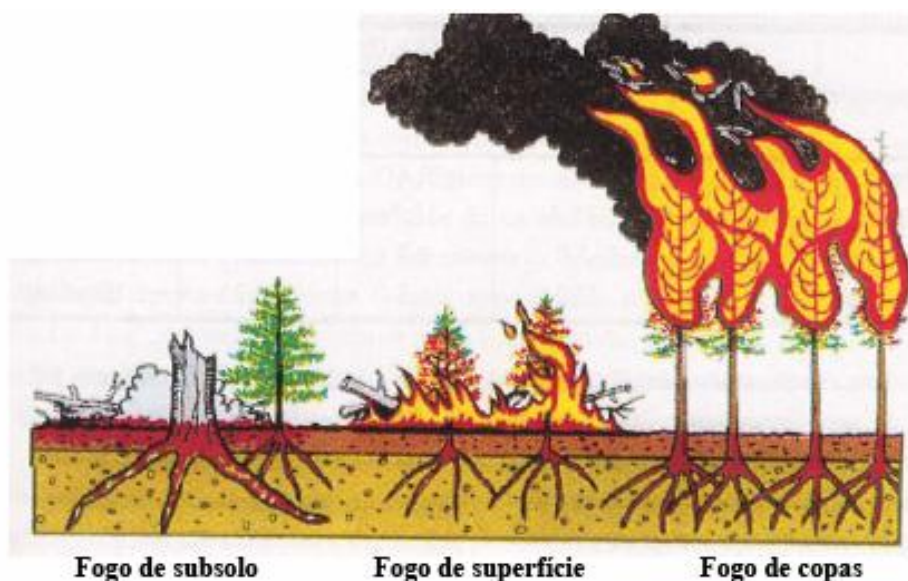
Distingue-se os fogos entre fogos controlados, que são aqueles que estão sob o controlo do Homem e fogos selvagens, os incêndios em que o Homem não tem controlo sob os mesmos.

Podemos distinguir um fogo pelo meio onde este ocorre. Os fogos florestais ocorrem em áreas de abundante vegetação, e os restantes, chamados incêndios urbanos que normalmente ocorrem em estruturas construídas pelo Homem [Miranda, 1998]. Mais recentemente surgiram os peri urbanos, e que são cada vez mais importantes. Estes fogos de interface urbano-florestal, que se prevê venham aumentar num futuro próximo, apresentam características próprias, afectando quase directamente as populações urbanas. Um dos seus efeitos manifesta-se através da degradação da qualidade do ar e, mesmo, de episódios de poluição atmosférica, com os consequentes impactos na saúde humana [Miranda *et al.*, 2008].

Em Portugal existem zonas agrícolas, matos e florestas, de acordo com o tipo de cobertura vegetal existente. As zonas agrícolas são, em geral, pouco susceptíveis a arder, dependendo, evidentemente da época do ano. Os matos, caso sejam constituídos sobretudo por herbáceas, tem um comportamento semelhante ao das searas, ou seja, o fogo espalha-se muito rapidamente pelo seu interior. Quando este é bastante denso, da altura de um pessoa ou mais, o risco é ainda maior, devido à elevada quantidade de energia libertada. Quanto às zonas florestais, a floresta portuguesa é constituída essencialmente por pinheiro bravo e outras espécies, originárias ou não do nosso território: sobreiros, azinheiras, eucaliptos e carvalhos. O pinheiro bravo tornou-se a espécie dominante no território continental português no século XX. Reúne as condições ideais para proporcionar o desenvolvimento de grandes incêndios, principalmente por se associar a vegetação arbustiva de grande combustibilidade. É em zonas com grandes

áreas contínuas de Pinheiro Bravo que se verificam maiores extensões de área ardida. Também o eucalipto é uma espécie bastante combustível. Por se encontrar, geralmente em povoamentos onde as extracções de matos são frequentes, não possui grande taxa de destruição pelos incêndios. Já os sobreiros e as azinheiras, essenciais constituintes dos sistemas agro-florestais alentejanos, são árvores resistentes ao fogo. A cortiça do sobreiro funciona até como auto defesa da planta às altas temperaturas [URL4].

A maioria dos fogos florestais, após a sua ignição, progride como fogo rasteiro ou de superfície, pois propaga-se em combustíveis rasteiros, como as herbáceas e os arbustos e em folhas, raízes e ramos mortos, que se encontram no solo. Caso as condições atmosféricas e a humidade dos combustíveis o permita, o fogo poderá ascender até ao topo das árvores (combustíveis aéreos). Quando o fogo atinge o topo das árvores, denomina-se fogo de copas, o qual é muito perigoso e difícil de combater ou suprimir. A figura 2.4 ilustra os diversos tipos de fogos, de acordo com o meio de propagação.



**Figura 2.4 Tipos de fogos relativamente ao meio em que se propagam [Cottrell, 1989].**

Quando se verifica a propagação do fogo através dos combustíveis da manta morta inferior, ou mesmo das raízes, numa combustão lenta, que se poderá propagar a distâncias consideráveis sem ser detectada, é usual referir-se a presença de um fogo de subsolo [Viegas, 1989]. Um outro tipo de fogo é o de projecção. Trata-se do fogo que é



propagado pela projecção ou arrastamento de materiais incandescentes que poderão provocar focos secundários.

## 2.3 Emissões dos incêndios florestais

Um fogo florestal consiste numa fonte potencial de elevadas quantidades de poluentes para a atmosfera, sendo indispensável conhecer essas emissões quando se pretende avaliar a qualidade do ar [Miranda, 1998].

As emissões para a atmosfera dos fogos florestais dependem de um conjunto de factores, a maior parte dos quais inter-relacionados, de que se destacam as características do combustível, a eficiência de combustão, a fase e o tipo de fogo e a meteorologia.

O tipo e a carga de combustível são dos factores que mais influência têm nas emissões. Segundo Peterson e Sandberg (1988), a variação no tipo de combustível contribui com cerca de 30% das incertezas associadas ao cálculo das emissões dos fogos florestais. A disposição espacial do combustível, seu tamanho e humidade afectam o tipo e a eficiência de combustão e, consequentemente, as emissões.

Os parâmetros meteorológicos têm também influência sobre as emissões. Afectam o tipo de combustível, o seu teor em humidade, e durante o fogo influenciam o seu tipo e eficiência de combustão.

### 2.3.1 Compostos emitidos

A combustão de material orgânico produz vapor de água e dióxido de carbono como principais produtos de acordo com a seguinte reacção:



Considerando que o  $\text{CH}_2\text{O}$  é a composição química média do material orgânico.

Esta reacção (equação 2.1) é, na sua essência, a reacção da fotossíntese – respiração. Neste sentido, a queima de biomassa pode ser entendida como o equivalente abiótico do

catabolismo respiratório do material biológico, restituindo os produtos da fotossíntese para a atmosfera na forma de  $\text{CO}_2$ . Porém, a biomassa não é exclusivamente formada por  $\text{CH}_2\text{O}$ , nem arde estequiometricamente, emitindo uma variedade de produtos que incluem compostos de carbono, compostos de azoto e enxofre, assim como partículas. [Levine *et al.*, 1991]

### **2.3.1.1 Carbono**

Em condições teóricas ideais, todo o carbono produzido na reacção de combustão é libertado sob a forma de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A eficiência da combustão define-se como a percentagem de carbono libertado sob a forma de  $\text{CO}_2$  relativamente ao valor máximo teórico. Em fogos de elevada eficiência os compostos emitidos são oxidados, enquanto que, em fogos de baixa eficiência predominam os compostos parcialmente oxidados ou reduzidos.

Usualmente, devido ao facto de as combustões serem incompletas, menos de 90% do carbono é libertado na forma de  $\text{CO}_2$ , cerca de 10% é libertado na forma de CO e o restante na forma de  $\text{CH}_4$  e HCNM (1% cada) [Levine *et al.*, 1991].

Numa escala de tempo suficientemente alargada, a queima de biomassa não influencia o balanço de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, dado que devolve para a atmosfera o  $\text{CO}_2$  removido pelas plantas algum tempo antes. No entanto, dado que a biomassa removida não é restituída tão rapidamente, o  $\text{CO}_2$  é adicionado à atmosfera e aí fica até ser removido por outro processo. Contribui, assim, para o efeito de estufa e, conseqüentemente, para as alterações climáticas [Andreae, 1991]. Por esta razão, e apesar de não ser considerado um poluente no sentido clássico, é um composto muito significativo, cujo estudo não deve ser descurado.

O CO é produzido durante a combustão incompleta da biomassa e por essa razão libertado em maior quantidade durante a fase incandescente de um fogo. Os níveis máximos de CO são obtidos imediatamente após o fim da fase flamejante.

A percentagem de emissão de hidrocarbonetos, relativamente ao seu conteúdo em carbono, pode atingir os 2 – 3 %, sendo o  $\text{CH}_4$  o componente mais significativo, com um valor de 0,5%. Os HCNM de  $\text{C}_{10}$  constituem 1% e os restantes, sob a forma de hidrocarbonetos de cadeia longa e de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), contribuem com cerca de 0,5% [Lobert e Warnatz, 1993].

Os fogos emitem compostos orgânicos voláteis (COV) em quantidades muito significativas, porém, não existem muitos estudos de caracterização detalhada destes poluentes. Entre os COV, destacam-se os compostos fenólicos por serem bastante irritantes para os tecidos humanos. São abundantemente produzidos por oxidação parcial da celulose.

As policlorodibenzodioxinas (PCDD) são também emitidas durante fogos florestais.

#### **2.3.1.2 Azoto e Enxofre**

Os compostos de azoto (N) e enxofre (S) são emitidos na combustão de vegetação que contenha azoto e enxofre e variam linearmente com a concentração destes compostos na vegetação, podendo depender da eficiência da combustão.

A emissão mais expressiva de azoto reactivo é representada sob a forma de  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ), dado que a combustão de biomassa é uma fonte de emissão muito significativa deste poluente para a atmosfera.

O  $\text{NO}_x$  participa na formação do ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), responsável pela deposição ácida, assim como na formação de  $\text{O}_3$  na troposfera.

A combustão, assim como o rápido aquecimento dos solos, é responsável pela emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  para a atmosfera durante os fogos florestais [Winstead *et al.*, 1991]. O  $\text{N}_2\text{O}$ , além de ser um gás com efeito de estufa, tem um papel relevante na destruição do  $\text{O}_3$  na estratosfera.

O composto de enxofre emitido em maiores quantidades é o  $\text{SO}_2$ . Todavia, só uma pequena parte do conteúdo em S é emitida; cerca de 40 a 60% permanece retido nas cinzas [Miranda, 1998]. A problemática da emissão deste composto reside na sua contribuição para a acidificação.

#### **2.3.1.3 Partículas**

A emissão de partículas durante um fogo é bem visível, afectando a qualidade do ar e a saúde humana. São produzidas em grande quantidade, podendo ser emitidas mais de  $0,6 \text{ ton.s}^{-1}$  em fogos de grandes dimensões [WHO/UNEP/WMO, 1999]. As partículas consistem em matéria orgânica, carbono negro e material inorgânico, como o carbonato de potássio e a sílica [Andreae, 1991]. Muitos compostos carcinogénicos estão contidos na fracção constituída pelo carbono orgânico.

Em número, a maior parte das partículas emitidas são ultra-finas (com diâmetro médio menor que 0,1 µm). Em termos mássicos, as partículas emitidas distribuem-se essencialmente em dois modos: partículas finas, com um diâmetro médio de 0,3 µm, produzidas durante a combustão do material orgânico, e partículas grosseiras, com um diâmetro médio superior a 10 µm.

#### **2.3.1.4 Radicais livres**

OS radicais livres são produzidos em abundância durante o processo de combustão nos fogos florestais. O tempo de vida destes compostos na atmosfera e a sua actividade, quando em contacto com tecidos humanos, é preocupante. A maior parte destes compostos condensa em poucos segundos, no entanto, alguns mantêm a sua reactividade durante cerca de vinte minutos, sendo por isso a exposição a aerossóis recém formados um motivo de preocupação [Andreae, 1991].

### **2.3.2 Cálculo das emissões**

As emissões dos poluentes durante os incêndios florestais são determinadas com base na eficiência de combustão, o tipo de vegetação e carga de combustível, nos factores de emissão relativos a cada poluente e na área ardida em cada uma das ocorrências [e.g. Wiedinmyera *et al.*, 2006]. Genericamente, a estimativa de emissão de um determinado poluente pode ser calculada da seguinte forma:

$$E_i = FE_i \times CC \times EC \times A \quad \text{Equação 2.2}$$

onde,

$E_i$  - emissão do poluente  $i$  (g)

$FE_i$  - factor de emissão para o poluente  $i$  (g.kg<sup>-1</sup>)

CC - carga combustível ou massa de combustível por unidade de área (kg.m<sup>-2</sup>)

EC - eficiência global de combustão (%)

A - área ardida (m<sup>2</sup>)

O esquema da figura 2.5 baseia-se no modelo EMISPREAD – Forest fire emissions model for south-European forest [Miranda *et al.*, 2005], agrupando os dados necessários para o cálculo das emissões segundo três vertentes fundamentais. Esta metodologia será aplicada para cada uma das ocorrências e para cada um dos poluentes considerados.



**Figura 2.5 Metodologia de cálculo de emissões de incêndios florestais.**

Os parâmetros, carga combustível e factores de emissão, encontrados na bibliografia [Miranda *et al.*, 2005] encontram-se expressos em função do tipo de povoamento florestal (nomeadamente resinosas, caducas e eucalipto), ao contrário dos dados de áreas ardidas discriminados unicamente em matos e povoamentos.

### **2.3.2.1 Tipo de vegetação**

Martins (2007) afirma que o tipo de vegetação ou combustível que alimenta o fogo florestal constitui um factor relevante ao nível do cálculo das emissões. O combustível disponível varia com a localização geográfica, o relevo e a época do ano. Perante a dificuldade de contabilizar a influência de cada um destes factores, optou-se por caracterizar o tipo de combustível e a respectiva carga, dado que esta representa a quantidade de combustível disponível por unidade de área. Os valores de carga

combustível, relativos à floresta portuguesa, são apresentados no Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC) de 2002 [PNAC, 2002]. Estes valores, presentes na Tabela 1, são para os seguintes tipos de combustível: matos, resinosas, caducas e eucalipto.

**Tabela 1 Valores de carga de combustível para diferentes tipos de combustível [PNAC, 2002].**

| <b>Tipo de combustível</b> | <b>Carga Combustível (kg.m<sup>-2</sup>)</b> |
|----------------------------|--|
| Resinosas                  | 7,9 – 9,3                                    |
| Caducas                    | 1,2 – 2,3                                    |
| Eucalipto                  | 3,9  |
| Matos                      | 0,9 – 1,1                                    |

Quanto à carga de combustível as resinosas são as que apresentam uma carga de combustível mais elevada, os matos apesar de apresentar uma carga de combustível baixa têm uma eficiência de combustão mais elevada.

### **2.3.2.2 Eficiência de combustão**

A eficiência de combustão pode ser entendida como a fracção de biomassa consumida relativamente à total disponível, sendo este um parâmetro relevante na estimativa das emissões de fogos florestais. Os valores de eficiência utilizados, relativos a matos e povoamentos, foram os indicados pelo PNAC e pela EEA (Tabela 2).

**Tabela 2 Valores de eficiência de combustão por tipo de combustível.**

| <b>Tipo de combustível</b> | <b>Eficiência de Combustão</b> | <b>Referência</b> |
|----------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Matos                      | 0,80                           | PNAC 2002         |
| Povoamentos                | 0,25                           | EEA 2004          |

De salientar que o valor relativamente elevado de eficiência de combustão dos matos se deve à baixa humidade dos mesmos e à sua estrutura física. Para os povoamentos florestais, a eficiência de queima está estreitamente relacionada com a heterogeneidade da distribuição de combustível disponível, que tipicamente se regista nas áreas florestais.

### **2.3.2.3 Factores de emissão**

Na determinação das emissões é frequente a distinção de duas fases de combustão: a fase de chama (“flaming”) e a de incandescência (“smoldering”). Durante a fase de chama, os compostos mais emitidos são o  $\text{CO}_2$  e o vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e, em menor quantidade, o  $\text{NO}_x$ , o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), o  $\text{N}_2$  e as partículas com elevado teor de carbono. Estas emissões mais oxidadas são fruto da elevada eficiência de combustão. Nesta fase, verifica-se um consumo de 20-90 % do combustível disponível [Miranda, 1998]. No final, durante a fase incandescente, o processo dominante é a oxidação em fase sólida. As emissões parcialmente oxidadas ou reduzidas são dominantes, nomeadamente o  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{HCNM}$ , hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH),  $\text{NH}_3$ , compostos de enxofre e partículas com baixo teor de carbono. Devido à variabilidade das emissões durante a combustão existem factores de emissão para cada uma das fases referidas [Peterson e Sandberg, 1988].

Face à diversidade de factores de emissão disponíveis na literatura, e pelo facto de se pretender representatividade, optou-se por um conjunto de factores de emissão relativos à floresta do sul da Europa [Miranda, 2004]. A Tabela 3 apresenta os factores de emissão médios considerados para os principais poluentes emitidos.

**Tabela 3 Factores de emissão médios para a floresta do sul da Europa [Miranda 2004].**

| Poluente        | Factores de Emissão (g.kg <sup>-1</sup> ) |           |         |           |
|-----------------|---|-----------|---------|-----------|
|                 | Matos                                     | Resinosas | Caducas | Eucalipto |
| CO <sub>2</sub> | 1477                                      | 1627      | 1393    | 1414      |
| CO              | 82  | 75        | 128     | 117       |
| CH <sub>4</sub> | 4   | 6         | 6       | 6         |
| HCNM            | 9   | 5         | 6       | 7         |
| PM2,5           | 9   | 10        | 11      | 11        |
| PM10            | 10  | 10        | 13      | 13        |
| NO <sub>x</sub> | 7   | 4         | 3       | 4         |
| SO <sub>2</sub> | 0,8                                       | 0,8       | 0,8     | 0,8       |
| NH <sub>3</sub> | 0,6                                       | 0,6       | 0,6     | 0,6       |

A análise da Tabela 3 permite observar a notória variabilidade registada para cada poluente em função do tipo de combustível. No entanto, é particularmente evidente a proximidade de valores entre os tipos caduca e eucalipto.

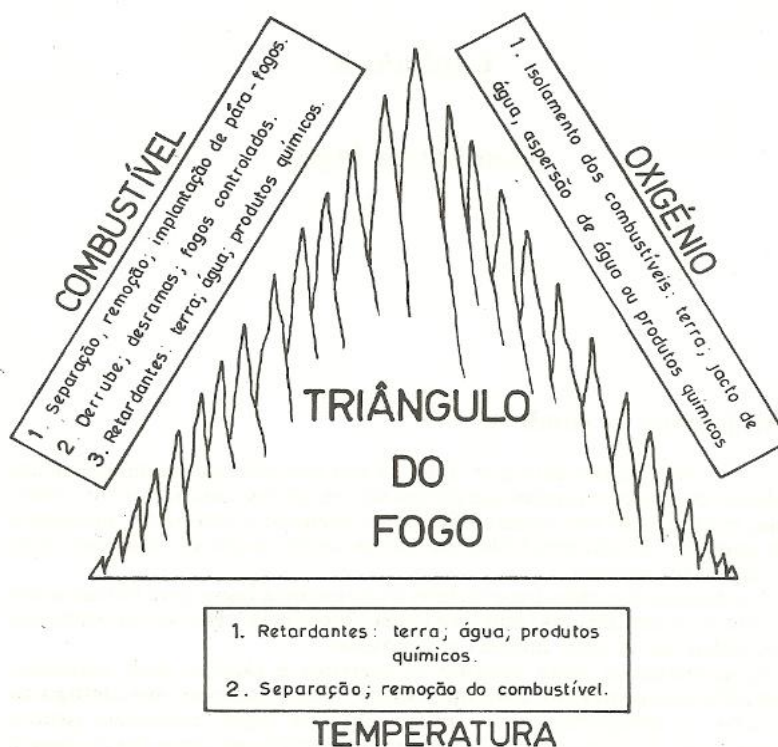
## 2.4 Os meios de combate aos fogos florestais

Apesar de todos os cuidados de prevenção e vigilância, os incêndios acabam por ocorrer, pelo que se torna necessário suprimi-los e combatê-los. Viegas (1993) afirma que os incêndios são uma das catástrofes em que o homem pode tomar uma parte activa e influir de forma decisiva no curso dos acontecimentos, ao contrário do que sucede nalgumas outras situações, em que pouco mais há a fazer do que prestar socorros e reparar os danos. A intervenção decidida e correcta dos meios humanos num incêndio florestal pode fazer a diferença entre um pequeno incidente, sem significado global, ou uma grande catástrofe, responsável por si só pela destruição de uma área da floresta, de bens e até de vidas humanas [Viegas, 1993].

O objectivo do combate a um fogo é a sua extinção, que compreende um conjunto de acções e tarefas que devem ser realizadas com prontidão e eficiência, constituindo um trabalho fatigante, perigoso e incómodo. Assim, no combate a finalidade é quebrar o



triângulo de fogo, através da acção sobre os seus componentes, temperatura, combustível e oxigénio (figura 2.6).



**Figura 2.6 Acções sobre os componentes do triângulo do fogo [Macedo e Sardinha, 1993b].**

Segundo Macedo e Sardinha (1993b), este combate pode ser feito de forma directa, pelo método directo de combate, pelo método paralelo ou pelo método indirecto. O método directo consiste em tentar extinguir uma faixa ao longo do perímetro do fogo, por meio de abafamento, por água ou separação mecânica do fogo e do combustível ainda não ardido. O método paralelo utiliza-se quando não se pode atacar directamente o perímetro de fogo, e para dar tempo à construção de uma linha de contenção, suficientemente afastada da frente de fogo para que homens e equipamento trabalhem em segurança. A faixa de contenção constrói-se paralelamente ao perímetro de fogo em progressão, e daí o nome do método. O método indirecto é mais flexível, quanto à localização da faixa de contenção, que os dois métodos anteriores, utilizando-se com este método um contra-fogo para destruição antecipada dos combustíveis superficiais que se situam entre a faixa de contenção construída e a linha de frente de fogo que se aproxima, pois que assim se

atenuará ou extinguirá o fogo principal antes de este atingir a faixa de contenção [Macedo e Sardinha, 1993b].

## 3 Modelação da propagação do fogo

O objectivo principal desta dissertação, como referido no capítulo introdutório, consiste na aplicação de um modelo de progressão de fogo, o FARSITE, para a análise do comportamento de diferentes fogos florestais, contribuindo assim para o projecto FUMEXP.

O FARSITE é um modelo que permite simular o comportamento do fogo. Nos Estados Unidos da América é o modelo mais utilizado pelos analistas de comportamento de fogo. Foi projectado para ser usado por pessoal com experiência na área dos fogos e por profissionais que estão familiarizados com as condições de terreno do incêndio a simular [URL5].

### 3.1 Modelação do comportamento do fogo

Os modelos de propagação do fogo têm como objectivo representar, através de simulação, o avanço da frente de fogo, utilizando um conjunto de regras ou equações que consideram variáveis relacionadas com a vegetação, topografia e condições atmosféricas. Estes modelos, aliados ao uso de recursos computacionais e sistemas de informação geográfica têm permitido um salto qualitativo no desenvolvimento de ferramentas que auxiliam a tomada de decisão com o objectivo de minimizar os impactos ecológicos e económicos causados pelo fogo [Pastor *et al.*, 2003].

Os modelos de comportamento do fogo podem enquadrar-se em diferentes tipos de classificações, de acordo com a natureza das equações, com as variáveis estudadas ou com o sistema físico modelado [Perry, 1998; André e Viegas 2001; Pastor *et al.*, 2003]. No que se refere à natureza das equações, podem ser:

- *empíricos* - caracterizam-se pelo facto da maior parte das equações utilizadas para relacionar variáveis de entrada e de saída terem carácter empírico, baseado num determinado número de experiências à escala de aplicação do modelo. A forma matemática de uma relação empírica não resulta de leis físicas fundamentais, aplicáveis num âmbito físico mais geral que o das experiências em causa. São baseados em resultados, quer de experiências de campo, quer de experiências à escala laboratorial.

- *semi-empíricos ou físicos incompletos* - são aqueles modelos que, apesar de se basearem em leis físicas, a principal das quais a lei da conservação da energia, não simulam fisicamente os fenómenos que ocorrem no interior da frente de fogo, que são a origem do termo fonte de calor da equação da conservação da energia. Para simular estes fenómenos utilizam relações empíricas. O modelo de Rothermel [1972], vastamente utilizado, é um modelo com estas características.
- *teóricos ou físicos completos* - baseiam-se em leis físicas e químicas para descrever um grande número de fenómenos envolvidos na propagação da frente de fogo. Tanto a informação de entrada necessária, como a informação de saída fornecida por estes modelos é bastante detalhada. O seu esforço computacional é muito elevado, dificultando a sua utilização em aplicações operacionais, apesar do seu bom desempenho. São, por esta razão, modelos usados essencialmente em investigação.

Para além desta classificação, os modelos também se podem dividir, de acordo com as variáveis estudadas, em:

- *modelos de carácter global* - são modelos de previsão do comportamento da frente de fogo completa, ou seja, abarcam uma parte extensa da linha da frente de fogo, tendo que lidar com condições de leito e ambientais que não são, nem constantes, nem uniformes;
- *modelos de carácter local* - são modelos que lidam apenas com uma parte da frente de fogo. A sua informação de saída básica é a velocidade de propagação da frente, segundo a normal à linha da frente.

Finalmente, os modelos podem ainda ser classificados com base no sistema físico simulado:

- *modelos de fogos de superfície* – o sistema físico é constituído por combustível superficial até 2 m de altura. Estão incluídas as pequenas árvores e vegetação arbustiva e herbácea;
- *modelos de fogos de copas* – o sistema é formado, quer pela vegetação superficial, quer pela vegetação aérea. Quando a combustão ocorre em ambos os *strata* o fogo considera-se de copas;
- *modelos de fogos de combustão lenta* – o sistema físico é constituído pela camada de material orgânico (húmus) que se acumula sobre o solo mineral numa floresta;

- *modelos de fogos por projecção* – o sistema simulado é constituído por faúlhas ou material em chamas, que é transportado pela coluna de convecção e projectado para fora do perímetro do fogo.

Muitos destes modelos de propagação, particularmente úteis como ferramentas de apoio à decisão, estão programados sobre sistemas de informação geográfica, de modo a aceder a informação de entrada, que se encontra em bases de dados geo-referenciadas, assim como, usufruir de ferramentas de pré e pós-processamento e até de ambientes de programação. No Anexo A listam-se diferentes modelos de propagação de fogos e as suas principais características.

Com base na análise das características dos diferentes modelos optou-se pelo modelo FARSITE para a realização deste estudo, pois este modelo está disponível para acesso livre e reúne as características necessárias para o objectivo deste trabalho, nomeadamente, os dados de saída que são fundamentais para este estudo, como a área ardida e o combustível consumido.

## 3.2 Modelo FARSITE

O FARSITE incorpora vários modelos de comportamento do fogo no espaço e tempo para simular um fogo numa paisagem variável sob diferentes condições ambientais: (i) modelo de propagação de um fogo de superfície, de Rothermel (1972); (ii) modelo de propagação de um fogo de copas, de Van Wagner (1993); (iii) modelo que estima a aceleração da propagação; (iv) modelo de projecção de partículas, de Albini (1979); (v) modelos de combustível; e (vi) e modelo de humidade dos combustíveis de Rothermel (1972). O modelo de propagação de Rothermel, pode-se considerar o núcleo principal do sistema FARSITE. A equação que governa o modelo (equação 3.1) representa um balanço de energia numa unidade de volume à frente da chama. Ilustra o conceito de que a velocidade de propagação resulta da razão entre a taxa de aquecimento do combustível e a energia necessária:

$$\vec{R} = \frac{I_r \pi (\vec{1} + \vec{\phi}_w + \vec{\phi}_s)}{\rho_b \epsilon Q_i} \quad \text{Equação 3.1}$$

em que:

$\vec{R}$  - velocidade de propagação ( $\text{m.s}^{-1}$ );

$I_r$  - intensidade da reacção, i.e., libertação de calor por unidade de área da frente de chama ( $\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ );

$\pi$  - razão de propagação do fluxo, i.e., fracção do calor libertado que é responsável pelo aquecimento do combustível e pela sua subsequente ignição (-);

$\vec{\phi}_w$  - factor que parametriza a influência do vento (-);

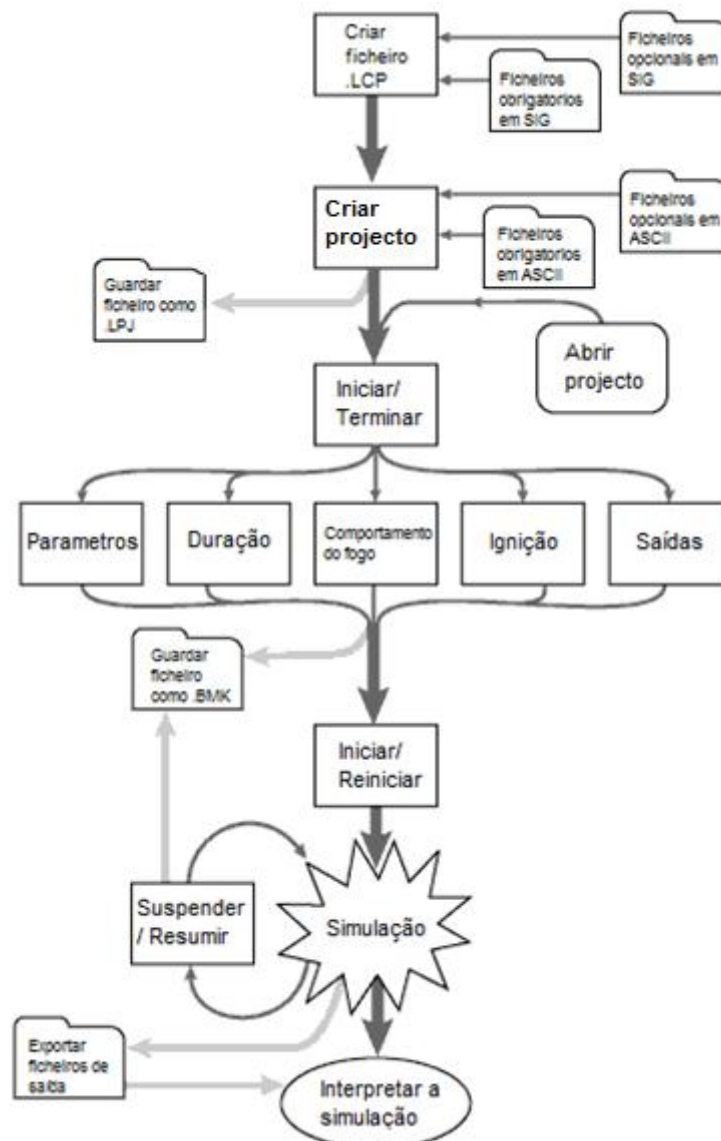
$\vec{\phi}_s$  - factor que parametriza a influência do declive (-);

$\rho_b$  - massa de combustível por unidade de volume ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

$\varepsilon$  - número de aquecimento efectivo, i.e., razão entre a massa de combustível por unidade de volume e a massa de combustível envolvido na ignição (-);

$Q_i$  - calor de pré-ignição, i.e., calor necessário para levar à ignição uma unidade de massa de combustível ( $\text{J.kg}^{-1}$ ).

As simulações no FARSITE exigem uma série de passos, que se apresentam na figura 3.1. O processo inicia-se com a preparação dos dados de entrada, que inclui a selecção de modelos a aplicar, bem como as suas configurações e termina com o processo de simulação.



**Figura 3.1** Passos a seguir para realizar uma simulação no FARSITE [URL5].

No esquema da figura 3.1 pode observar-se que o FARSITE usa ficheiros obrigatórios e opcionais, sendo que nos obrigatórios são introduzidos os dados de entrada, que apresentam informações espaciais sobre a topografia e combustíveis, e os dados meteorológicos.

Este modelo requer o suporte de um sistema SIG – Sistema de informação geográfica, que providencia a informação de topografia e combustível. Assim, pode ajudar os analisadores a determinar a taxa e direcção de propagação de um incêndio e a prever quando este vai chegar a um determinado local [URL5], pois produz mapas de progressão do fogo desenhando o perímetro ao longo do tempo. Com a utilização deste

modelo, a extinção de um fogo pode ser analisada para diferentes táticas de ataque terrestre e aéreo, que o FARSITE tem à disposição.

No FARSITE, no ficheiro do combustível é necessário introduzir a humidade do combustível e os modelos de combustível (Anexo B). Em relação ao ficheiro meteorológico, é necessário fornecer dados do dia e do mês em que o fogo ocorreu, bem como dados de precipitação, de temperatura máxima e mínima diária, de humidade, também máxima e mínima, e a elevação do terreno. O ficheiro referente ao vento, inclui direcção e velocidade do vento e dados de nebulosidade. No final, o FARSITE calcula a progressão do incêndio, para vários períodos de tempo, em condições heterogéneas de terreno, de combustível e meteorologia.



## 4 Aplicação do FARSITE

Neste capítulo apresenta-se a aplicação do modelo FARSITE para estudar o comportamento de três fogos que ocorreram no distrito de Coimbra e que são casos de estudo do projecto FUMEXP.

No mapa da figura 4.2 pode observar-se o local exacto onde ocorreram os três incêndios.

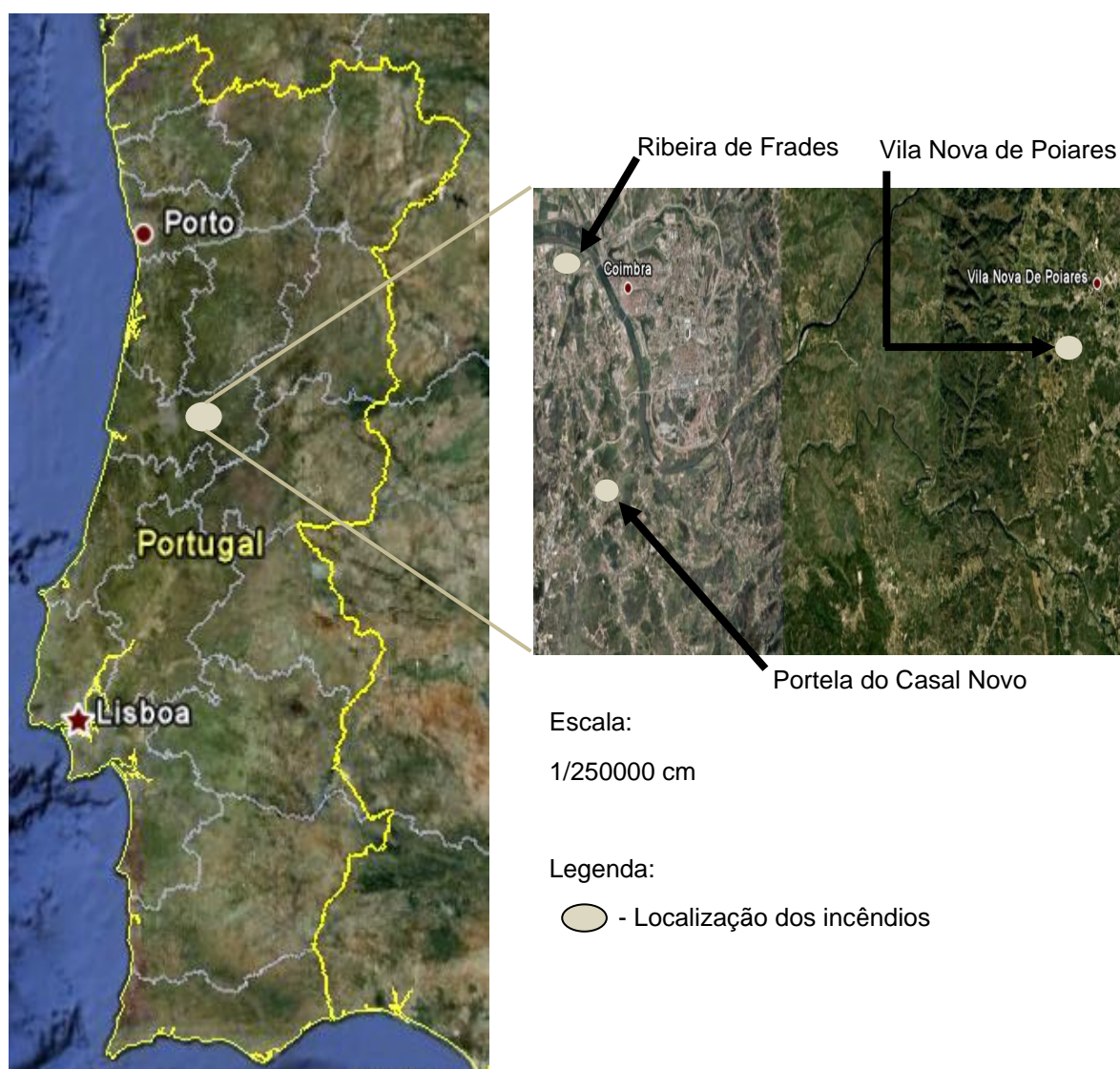


Figura 4.1 Local da ocorrência dos incêndios.

Dos incêndios estudados pelo projecto FUMEXP dois ocorreram no concelho de Coimbra, nas freguesias de Ribeira de Frades e de Almalaguês (Portela do Casal Novo), e outro no concelho de Vila Nova de Poiares, na freguesia de Lavegadas (Ribeira da Sabouga).

Na tabela 4 listam-se as principais características dos 3 incêndios: o tipo de incêndio, de acordo com o combustível consumido, a hora e o local da ocorrência e a área ardida. A informação que consta na tabela 4 é disponibilizada pela Autoridade Florestal Nacional em [URL2].

**Tabela 4 Dados dos três incêndios ocorridos [URL2].**

| Parâmetros                       |  | Informação                               |  |
|----------------------------------|--|--|--|
| <b>Ano</b>                       | 2008   | 2009                                     | 2009   |
| <b>Distrito</b>                  | Coimbra                                      | Coimbra                                  | Coimbra  |
| <b>Concelho</b>                  | Coimbra                                      | Coimbra                                  | Vila Nova de Poiares                           |
| <b>Freguesia</b>                 | São Martinho do Bispo<br>(Ribeira de Frades) | Almalaguês                               | Lavegadas                                      |
| <b>Local</b>                     | Rua 25 de Abril                              | Portela casal novo<br>(Fonte da Portela) | Sabouga - Sta Quitéria<br>(Ribeira de Sabouga) |
| <b>X</b>                         | 168869                                       | 178093                                   | 194633   |
| <b>Y</b>                         | 359386                                       | 356452                                   | 363430   |
| <b>Tipo</b>                      | Mato   | Florestal                                | Florestal                                      |
| <b>Data/hora de Alerta</b>       | 17-08-2008 12:38                             | 15-07-2009 15:08                         | 01-09-2009 21:00                               |
| <b>Data/hora de Intervenção</b>  | 17-08-2008 12:53                             | 15-07-2009 15:16                         | 01-09-2009 21:10                               |
| <b>Data/hora de Extinção</b>     | 17-08-2008 15:22                             | 15-07-2009 17:54                         | 02-09-2009 19:28                               |
| <b>Duração do Incêndio</b>       | 2h44min                                      | 2h48min                                  | 22h28min                                       |
| <b>Área Total Consumida (ha)</b> | 0,5  | 0,08                                     | 25   |
| <b>Área Povoada (ha)</b>         | 0  | 0  | 0  |
| <b>Área Florestal (ha)</b>       | 0  | 0,08                                     | 25   |
| <b>Área Agrícola (ha)</b>        | 0,5  | 0  | 0  |

O incêndio de Ribeira de Frades, no concelho de Coimbra, ocorreu no dia 17 de Agosto de 2008, resultando numa área ardida de 0,5 ha de mato. O incêndio de Portela do Casal Novo, também no distrito de Coimbra, ocorreu no dia 15 de Julho de 2009, tendo

consumido uma área florestal de 0,08 ha. Por último o incêndio de Vila Nova de Poiares ocorreu no dia 1 de Setembro de 2009 e a área florestal ardida foi de 25 ha.

## 4.1 Dados de entrada

Os dados necessários para realizar simulações com o FARSITE compreendem os três braços do triângulo ambiental do fogo: combustível, condições meteorológicas e topografia.

A obtenção dos ficheiros do modelo de combustível foi possível através da análise de dados de uso do solo retirados do Corine Land Cover 2006 (CLC) [URL6], pelo que foi necessário escolher uma abordagem que permitisse atribuir a cada tipo de uso do solo valores para os modelos de combustível. No entanto, dada a morosidade, complexidade e especificidade da construção de modelos específicos de combustível, optou-se por recorrer aos 13 modelos base disponíveis no FARSITE (Tabela 10 no Anexo B).

Face ao uso do solo e atendendo ao tipo de combustível consumido por cada fogo e aos modelos de combustível do FARSITE estabeleceram-se as respectivas ligações apresentadas na tabela 5.

**Tabela 5 Uso do solo e respectivo modelo de combustível para cada incêndio.**

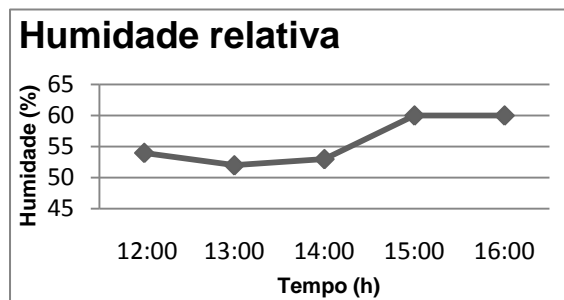
| <b>Incêndio</b>       | <b>Uso do solo (tipo de combustível)</b>   | <b>Modelo de combustível do FARSITE</b> |
|-----------------------|--|---|
| Ribeira de Frades     | Culturas anuais + Espécie florestal (Pasto fino com mato)  | 2                                       |
| Portela do Casal Novo | Floresta relativamente densa (Pinheiro e Eucalipto)  | 9                                       |
| Vila Nova de Poiares  | Floresta relativamente densa (Pinheiro e Eucalipto) e Vegetação arbustiva alta e floresta degradada ou de transição (Mato denso, com carga média de folhada) | 6 e 9                                   |

Segundo o CLC o solo onde ocorreu o incêndio de Ribeira de Frades está classificado como agrícola, no entanto e segundo a fonte dos bombeiros, o terreno apresentava silvas, feno seco e algumas árvores, daí ter-se optado por o tipo de uso do solo de territórios agro-florestais (modelo de combustível 2). O solo onde ocorreu o incêndio de Portela do Casal Novo está classificado pelo CLC como zona de floresta mista, em que predomina o Eucalipto e o Pinheiro (modelo de combustível 9) segundo fonte dos bombeiros sapadores de Coimbra. O incêndio de Vila Nova de Poiares ocorreu, de acordo com a informação relativa ao tipo de uso do solo cedida pelo CLC, em dois meios, sendo o meio predominante de floresta mista, também com predominância do Eucalipto e Pinheiro (modelo de combustível 9) e um meio semi-natural de mato denso, com carga média de folhada (modelo de combustível 6).

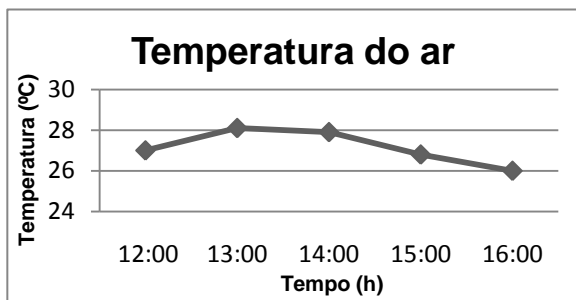
O ficheiro meteorológico requer informação relativa à velocidade e direcção do vento, humidade, temperatura e precipitação. Esta informação foi retirada do SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos), onde está disponível informação meteorológica a nível nacional [URL7].

Para Ribeira de Frades, os dados meteorológicos usados na simulação foram os da estação de São Pedro Dias, pois esta era a estação do SNIRH mais próxima que dispunha da totalidade dos dados para este dia. Os dados recolhidos foram a humidade, a temperatura e a velocidade e direcção do vento, horários, para o período de duração do incêndio. Não ocorreu precipitação neste dia. Na figura 4.2 estão representadas as condições meteorológicas durante o incêndio.

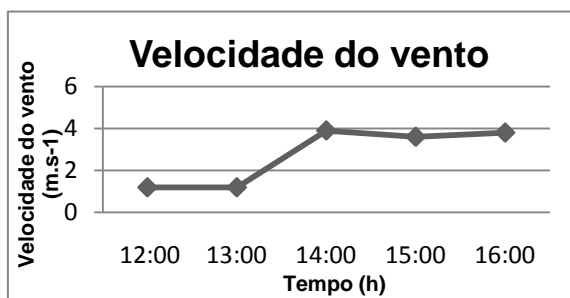
a)



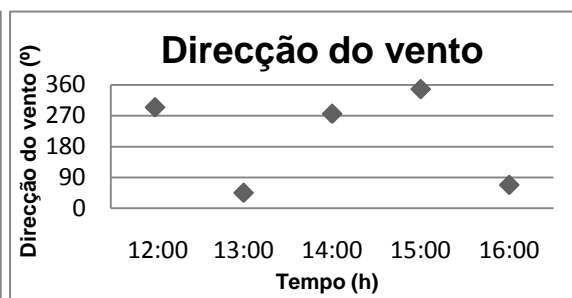
b)



c)



d)

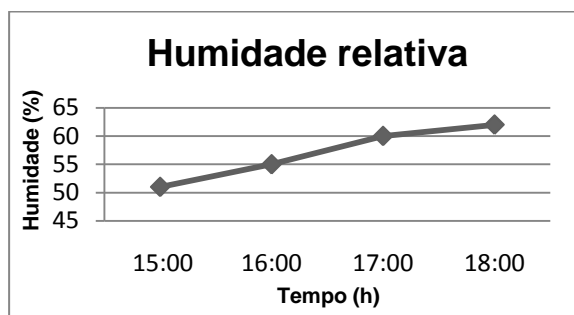


**Figura 4.2 Humidade do ar (a), temperatura do ar (b) e velocidade do vento (c) e direcção do vento (d) medidos no período em que ocorreu o incêndio de Ribeira de Frades, no dia 17-08-2008.**

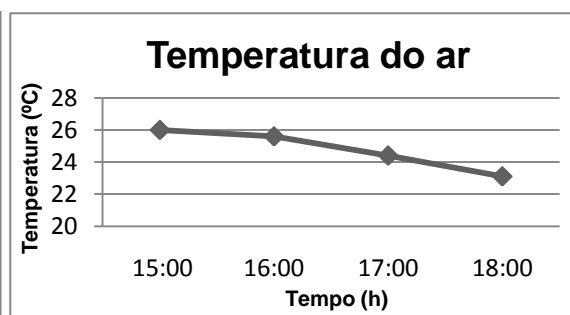
Os valores de humidade, de temperatura e de velocidade do vento foram normais para a época do ano, ou seja, a humidade relativa é baixa, tendo em conta o clima em Portugal, a temperatura é elevada de acordo com a temperatura média anual, a velocidade do vento é fraca e quanto à direcção do vento observa-se que não houve grande variação ao longo do período de duração do incêndio, estando sempre de Norte, entre Noroeste e Nordeste.

Para Portela do Casal Novo utilizaram-se os dados da estação de Tentúgal, mais uma vez por ser a estação meteorológica mais próxima do local que dispunha da totalidade dos dados para esse dia (figura 4.3).

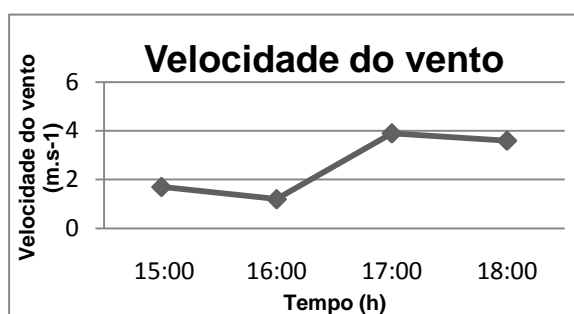
a)



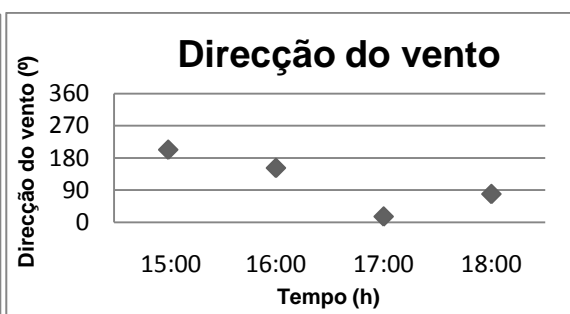
b)



c)



d)

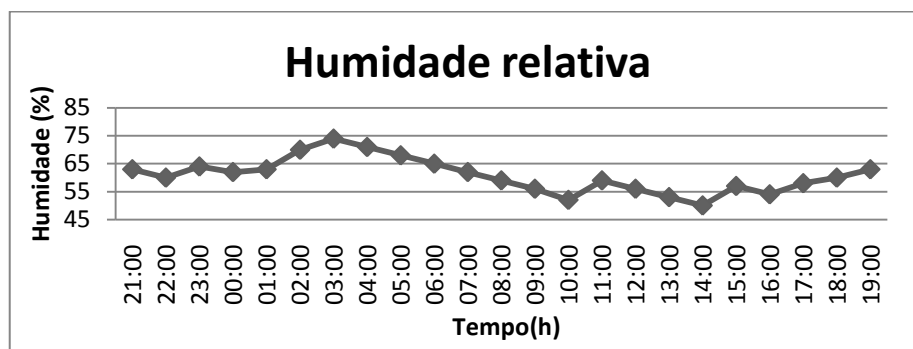


**Figura 4.3 Humidade do ar (a), temperatura do ar (b) e velocidade do vento (c) e direcção do vento (d) medidos no período em que ocorreu o incêndio de Portela do Casal Novo, no dia 15-07-2009.**

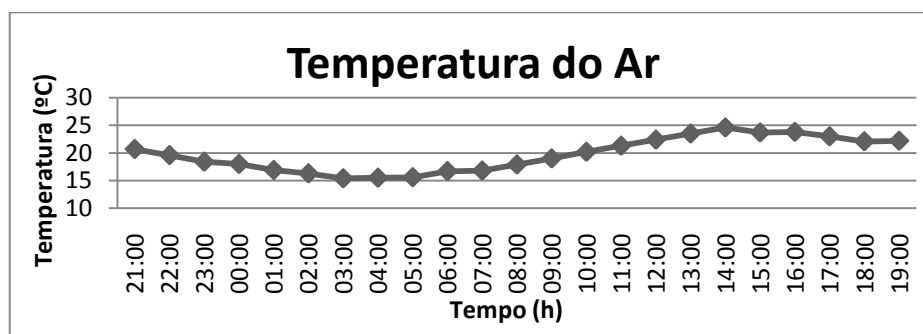
Mais uma vez está-se perante valores típicos para a época do ano, com valores de humidade baixos, a temperatura elevada e velocidade do vento baixa. Ao analisar o gráfico da direcção do vento observa-se que este não houve grande variação ao longo do período de duração do incêndio, os ventos são de Sul e rodam para Nordeste.

Para o incêndio de Vila Nova de Poiães, procedeu-se do mesmo modo que nos anteriores, tendo sido utilizados os dados meteorológicos da estação de Oliveira do Hospital (figura 4.4).

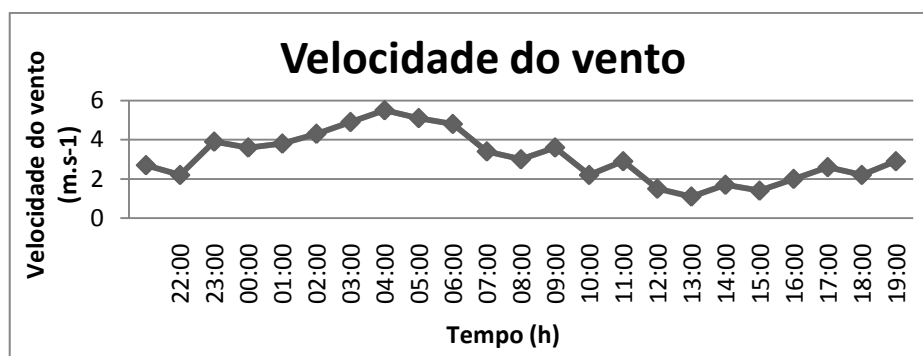
a)



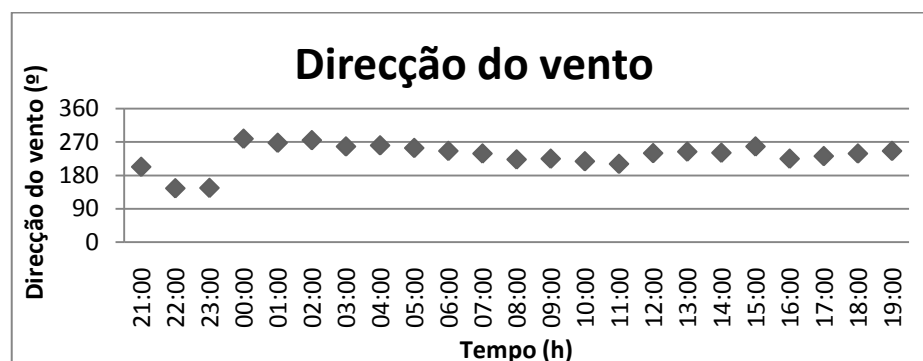
b)



c)



d)



**Figura 4.4** Humidade do ar (a), temperatura do ar (b) e velocidade do vento (c) e direcção do vento (d) medidos no período em que ocorreu o incêndio de Vila Nova de Poiares, nos dias 1 e 2 de Setembro de 2009.

Como em Vila Nova de Poiares a duração do incêndio foi muito extensa, observa-se temperaturas e humidade muito oscilantes, havendo uma grande variação entre o dia e a noite. Também a velocidade do vento foi mais acentuada durante a noite, quanto à direcção do vento, ouve variação ao longo do período do incêndio, sendo predominante de sudoeste.

Os ficheiros de elevação do terreno são obtidos através de uma carta de altimetria [URL 8] e a partir das funcionalidades *slope* e *aspect* do ArcGIS®, podem construir-se os ficheiros declive e exposição aplicados ao domínio de simulação definido (Figura B.1 no Anexo B). Assim, e atendendo às áreas em estudo, áreas muito pequenas para este tipo de ficheiro, considerou-se uma cota constante para cada fogo.

Para o incêndio de Ribeira de Frades, a elevação é de 50 m e considerou-se a área plana. Na área do incêndio de Portela do Casal Novo, a elevação encontra-se na cota dos 100 m havendo um declive acentuado. Em Vila Nova de Poiares a elevação encontra-se na cota dos 200 m havendo um ligeiro declive do terreno.

Na tabela 6 é possível observar os principais dados introduzidos no FARSITE.

**Tabela 6 Tabela resumo dos dados de entrada**

|                             |   | Ribeira de Frades | Portela do Casal Novo | Vila Nova de Poiares |
|-----------------------------|---|-------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>Combustível</b>          | <b>Modelos</b>                                | 2                 | 9                     | 6 e 9                |
| <b>Topografia</b>           | <b>Elevação (m)</b>                           | 50                | 100                   | 200                  |
|                             | <b>Declive</b>                                | 0%                | 7%                    | 3%                   |
| <b>Domínio de simulação</b> | <b>Tamanho do ficheiro (linhas x colunas)</b> | 50 x 50           | 40 x 30               | 60 x 70              |
|                             | <b>Tamanho de cada célula (m<sup>2</sup>)</b> | 20 x 20           | 5 x 5                 | 20 x 20              |

A tabela 6 foi construída com base nos dados de entrada necessários para a simulação. Os modelos de combustível foram seleccionados tendo em conta os dados relativos ao uso do solo, este dado é fundamental na progressão de um incêndio. Quanto à topografia o declive é deveras importante, pois um incêndio que se propaga num terreno inclinado o seu combate é também muito dificultado.

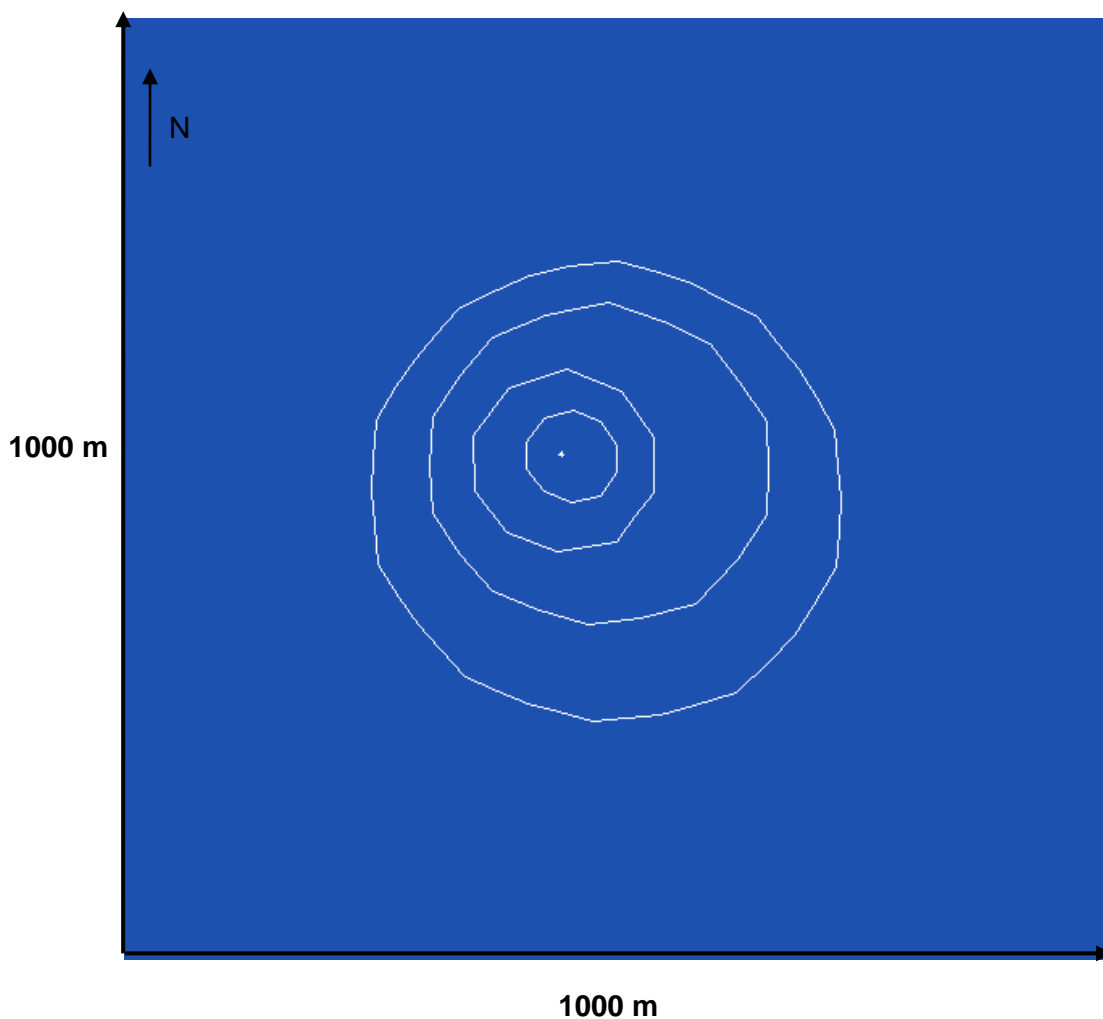


Na simulação foi considerado um domínio bastante extenso para perceber qual o comportamento do fogo se não existisse qualquer impedimento, já que na realidade o domínio é muito inferior.

## **4.2 Análise e discussão dos resultados**

A progressão de cada um dos incêndios foi simulada com o modelo FARSITE, considerando os dados descritos no subcapítulo anterior. Os resultados alusivos à progressão apresentam-se nas figuras 4.5, 4.6, 4.7. As cores base em cada figura estão relacionadas com o tipo de combustível considerado.

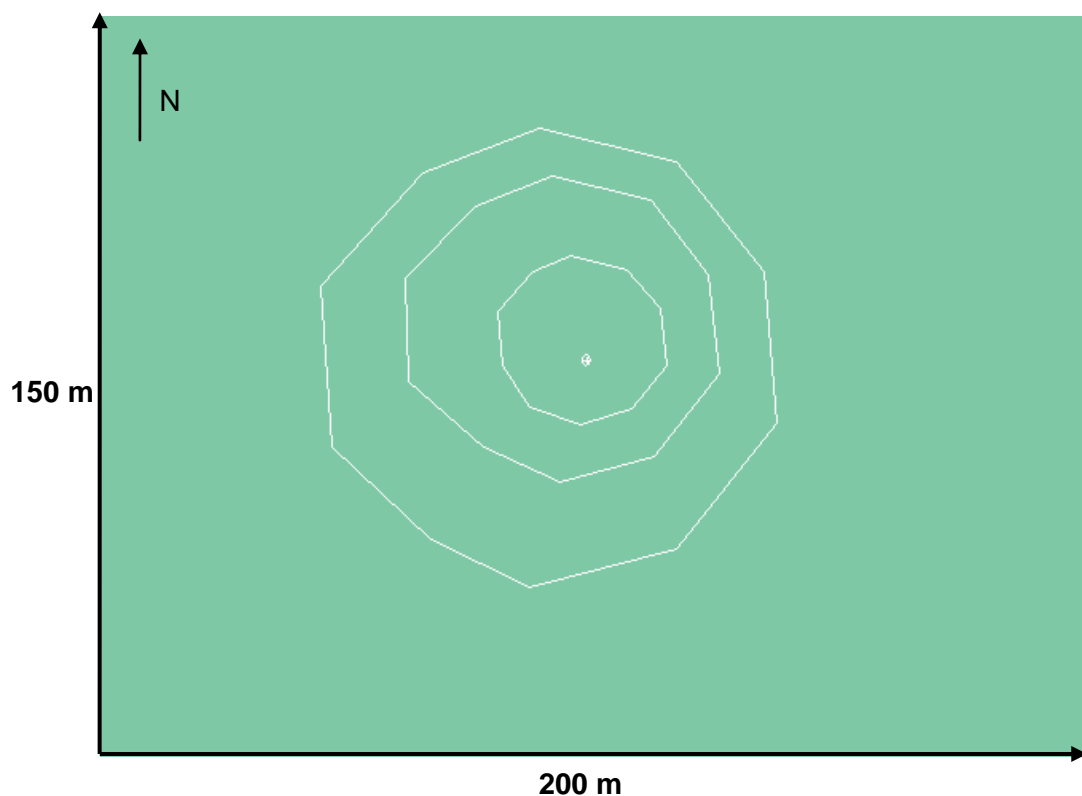
A figura 4.5 refere-se ao incêndio de Ribeira de Frades, nesta pode encontrar-se informação relativa à progressão do incêndio na área simulada.



**Figura 4.5 Progressão do incêndio de Ribeira de Frades, por hora, na área simulada.**

As isolinhas (a branco) representam a frente de fogo para cada intervalo de tempo definido em 1 hora. A forma e direcção destas isolinhas variam em função da intensidade e velocidade máxima de propagação, como combinação do efeito de vento e topografia. Tal como se pode observar na Figura 4.5, o fogo progride de acordo com o vento predominante de Noroeste. A área ardida foi bastante extensa (16 ha), como seria de esperar, uma vez que a progressão ocorre em zonas de pasto fino com mato (modelo combustível 2) e os incêndios propagam-se facilmente e com grande velocidade neste tipo de modelo de combustível.

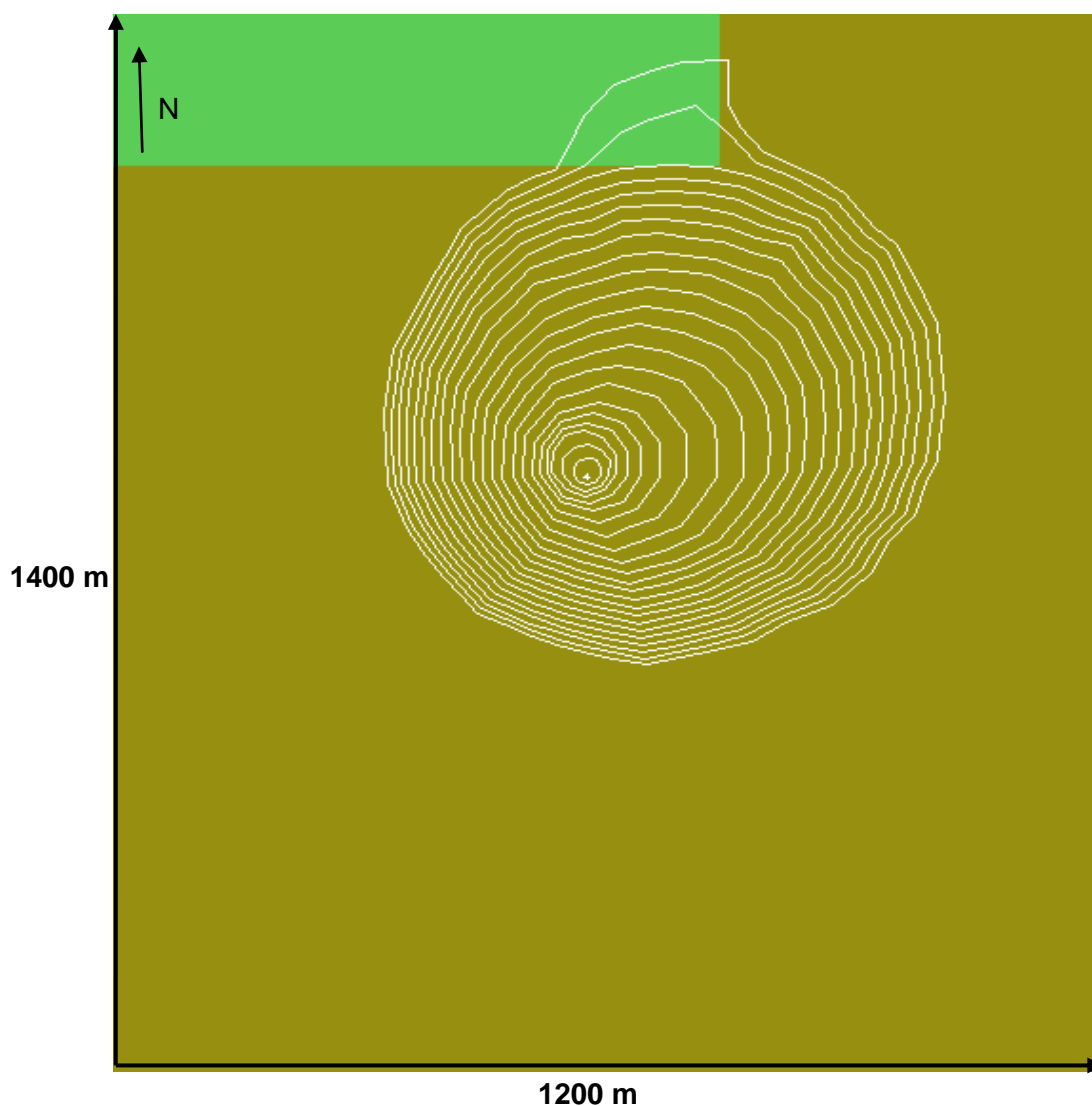
Na figura 4.6 representa-se a progressão do incêndio de Portela do Casal Novo. Foi um incêndio que teve a duração de 3 horas.



**Figura 4.6 Progressão do incêndio de Portela do Casal Novo, por hora, na área simulada.**

O local onde lavrou o fogo de Portela do Casal Novo o terreno apresenta uma inclinação de Oeste para Este. Na simulação a progressão parece fazer-se de forma rápida, pois a vertente de inclinação é favorável à direcção do vento de Nordeste. A área ardida foi bastante reduzida (0,6 ha), uma vez que a progressão ocorre em zona de Pinheiro e Eucalipto (modelo combustível 9) e a progressão é mais lenta neste tipo de modelo de combustível.

A figura 4.7 corresponde à simulação referente ao incêndio de Vila Nova de Poiões, um incêndio de grandes proporções, com uma extensa área ardida, teve duração de 22 horas.

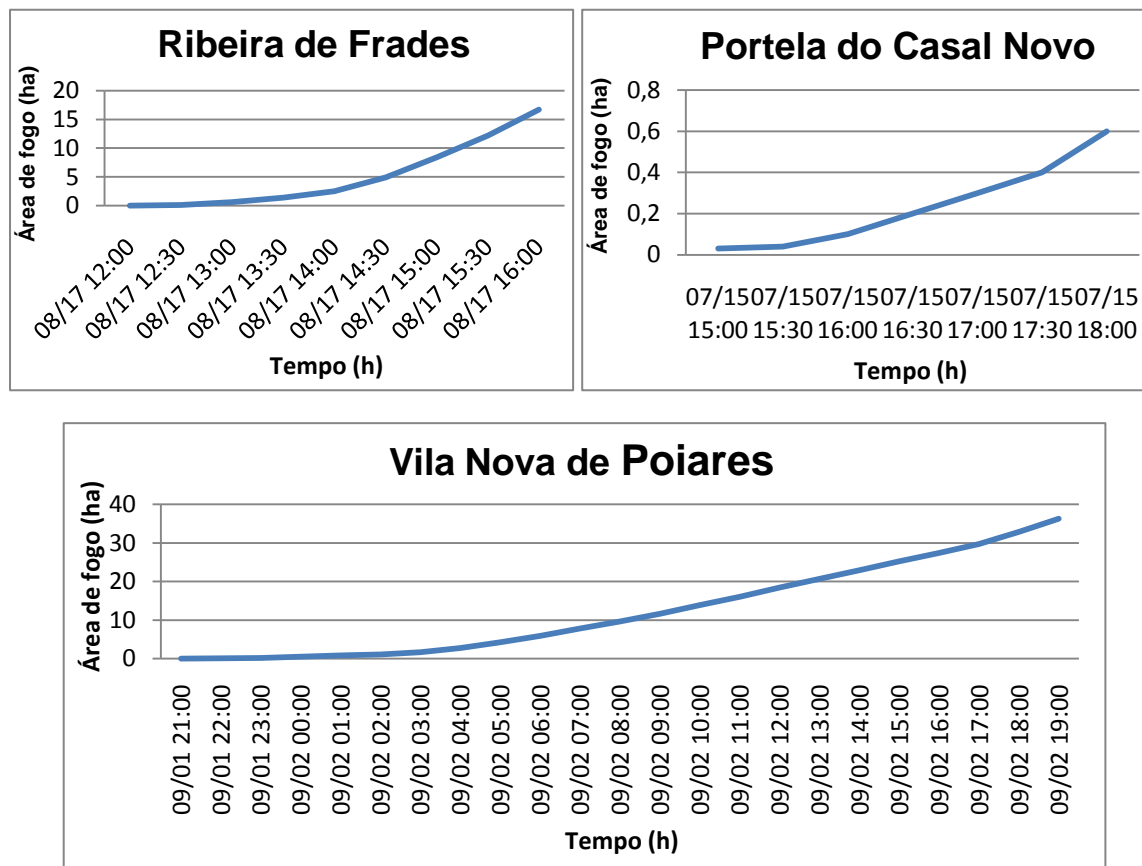


**Figura 4.7 Progressão do incêndio de Vila Nova de Poiares, por hora, na área simulada.**

Na figura 4.7 observa-se que a área de fogo foi bastante extensa (36 ha), a duração do incêndio teve um papel relevante para que este atingisse estas proporções uma vez o meio predominante onde ocorreu a progressão é uma zona de Pinheiro e Eucalipto (modelo combustível 9), meio em que a progressão é mais lenta. Já no meio semi-natural, ou seja, zona de mato denso, com carga média de folhada (modelo de combustível 6) o incêndio propaga-se facilmente e com grande velocidade.

O fogo progride de acordo com o vento predominante de Sudoeste e observa-se que durante a noite as linhas de progressão são mais largas entre si, pois é também neste período que o vento é mais intenso.

Nos gráficos da área ardida (figura 4.8), pode-se observar a área ardida por hora para cada incêndio simulado.

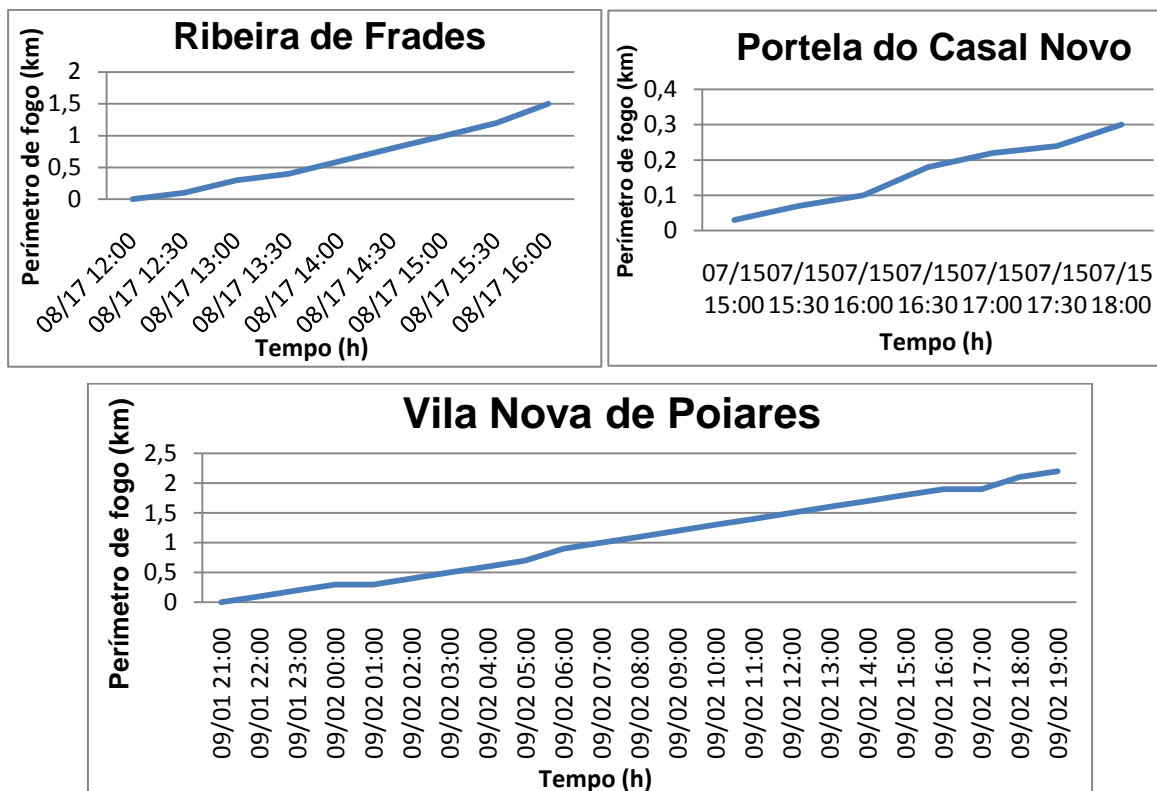


**Figura 4.8** Evolução da área ardida simulada para os vários incêndios.

Depois de se observar as áreas ardidas dos diferentes incêndios, pode-se afirmar que, apesar do incêndio de Vila Nova de Poiares ser o que consumiu maior área no total, devido ao número de horas que lavrou, o incêndio de Ribeira de Frades foi o que ardeu maior área por hora, pois como já se referiu anteriormente é o que apresenta o modelo de combustível em que os incêndios propagam-se facilmente e com grande velocidade.

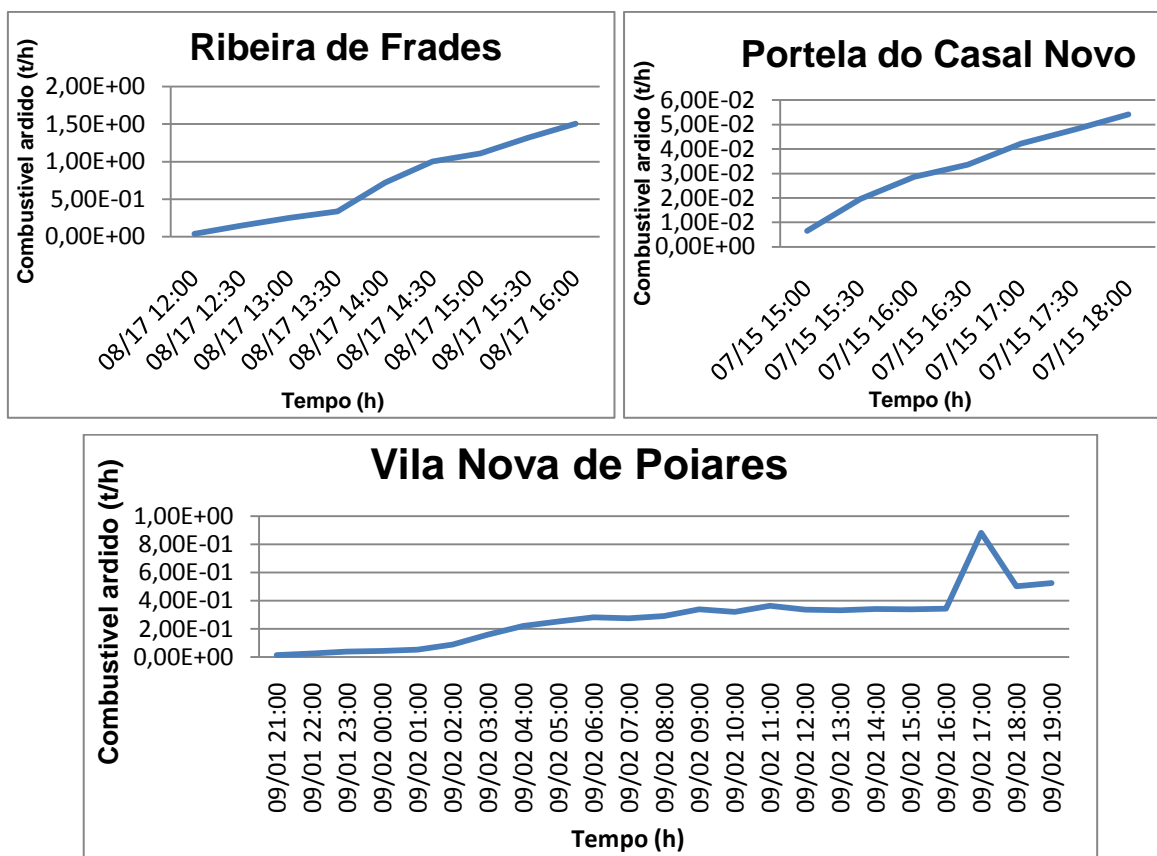
O padrão de desenvolvimento do fogo ultrapassar em larga escala os limites definidos nos incêndios reportados.

Nos gráficos 4.9 pode-se analisar o perímetro de fogo.



Nos três incêndios o perímetro teve um comportamento semelhante, ou seja, um comportamento linear, conclui-se então que não houve grandes variações no terreno, quer a nível do solo, quer a nível meteorológico.

Os gráficos da taxa de combustão (figuras 4.10) correspondem às toneladas de combustível ardido por hora.



**Figura 4.10 Combustível consumido ao longo do tempo nos vários incêndios.**

Nos três incêndios o combustível arde proporcionalmente com o tempo, apenas na simulação de Vila Nova de Poiares se verifica um “pico”, este “pico” coincide com mudança de modelo de combustível, ou seja, ao entrar noutro tipo de solo o incêndio atingiu maiores proporções consumindo assim mais combustível.

Assim, e depois de analisar os vários parâmetros dos diferentes incêndios simulados, vai comparar-se a área ardida na simulação com a área ardida reportada.

**Tabela 7 Comparação da área ardida na simulação e na realidade**

| Incêndio              | Área ardida reportada (ha) | Área ardida na simulação (ha) |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Ribeira de Frades     | 0,5                        | 16,7                          |
| Portela do Casal Novo | 0,08                       | 0,6                           |
| Vila Nova de Poiares  | 25                         | 36,3                          |

Pela análise da tabela 7 verifica-se que na simulação a área ardida é superior à área ardida reportada, o que se poderá dever à actuação de meios de combate no decorrer dos incêndios. Daí, e como o FARSITE tem essa funcionalidade, realizaram-se de novo as simulações, mas desta vez com a intervenção dos meios de combate.

### **4.3 Simulações efectuadas com a intervenção dos meios de combate**

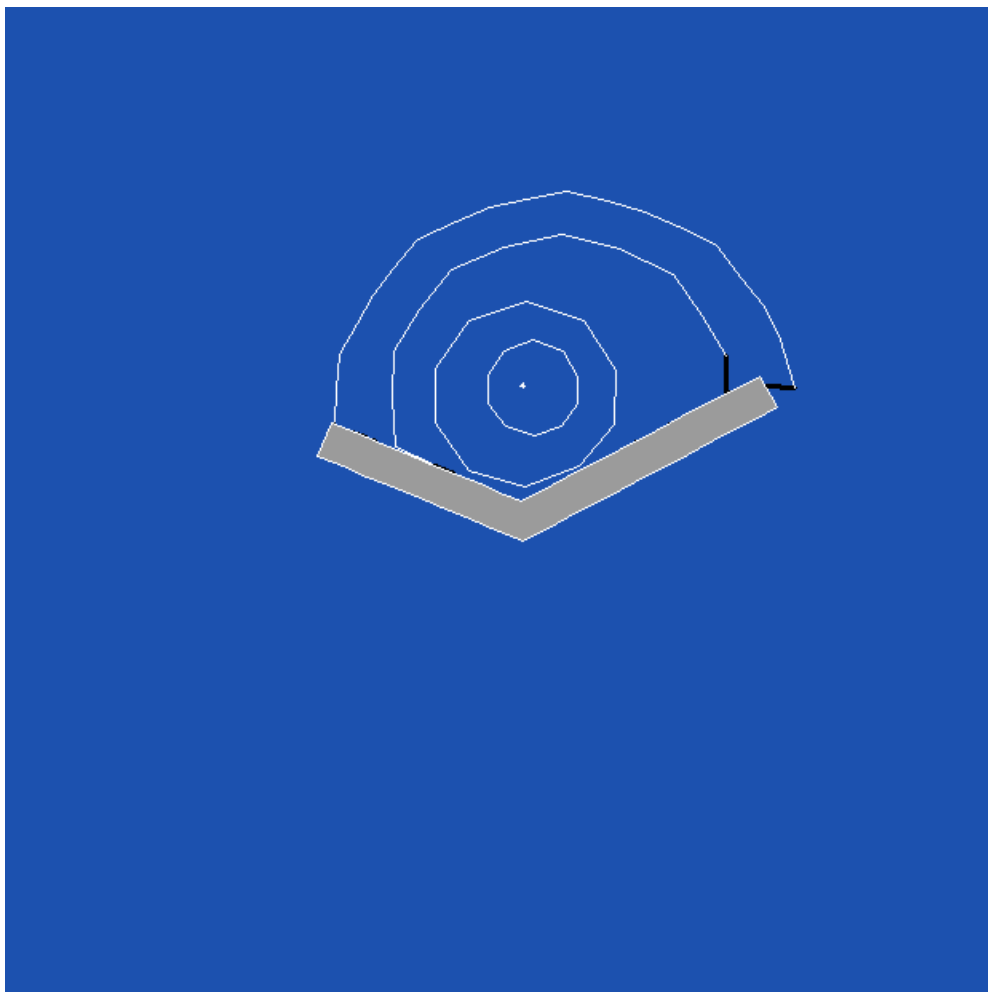
Os meios de combate incluídos no FARSITE têm como objectivo diminuir a área ardida. Com base na informação que foi cedida pelos Bombeiros Sapadores de Coimbra criou-se um ficheiro no programa para simular o combate a incêndio. Para isso foram definidos os recursos a utilizar, assim como o tipo de ataque. Sabe-se que o ataque nos incêndios de Ribeira de Frades e Portela do Casal Novo foi realizado por via terrestre. Os dados introduzidos no FARSITE consistiram no número de auto-tanques que combateram o incêndio, ligeiros e pesados, e na duração do ataque (Anexo C).

Do incêndio em Vila Nova de Poiares não existe qualquer informação relativa aos meios de combate, apenas se sabe que estiveram duas corporações no terreno. Tentou idealizar-se um cenário o mais idêntico possível à realidade, tendo em conta as proporções do incêndio. Assim quanto aos meios de combate assumiu-se que estiveram no terreno 5 veículos pesados, 5 veículos ligeiros e um helicóptero, pois os meios aéreos costumam intervir em incêndios com estas características.

Apesar de em nenhum dos incêndios existir informação quanto ao local onde o ataque foi efectuado e quais as melhores acessibilidades para os bombeiros, na simulação considerou-se o ataque contra o vento. Na simulação todos os ataques se iniciam 30 minutos após o início do incêndio, pois teve-se em conta o período que o incêndio lavra antes de ser dado o alerta e o tempo que os bombeiros demoram até a local.

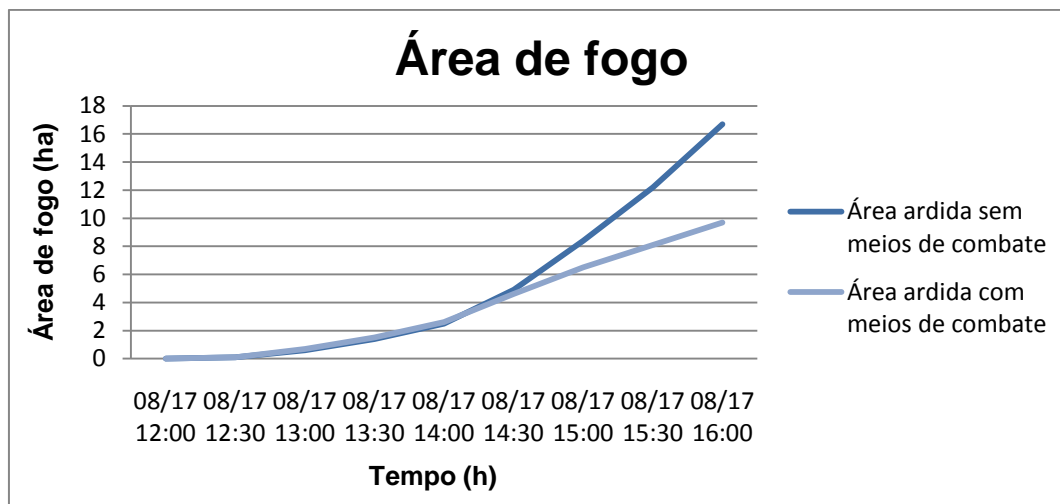
Depois de simulados os meios de combate, delimita-se uma barreira na área de fogo e inicia-se a simulação. Pode observar-se nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13 o resultado das simulações com a barreira.





**Figura 4.11 Progressão do incêndio de Ribeira de Frades, por hora, na área simulada, com a intervenção de meios de combate.**

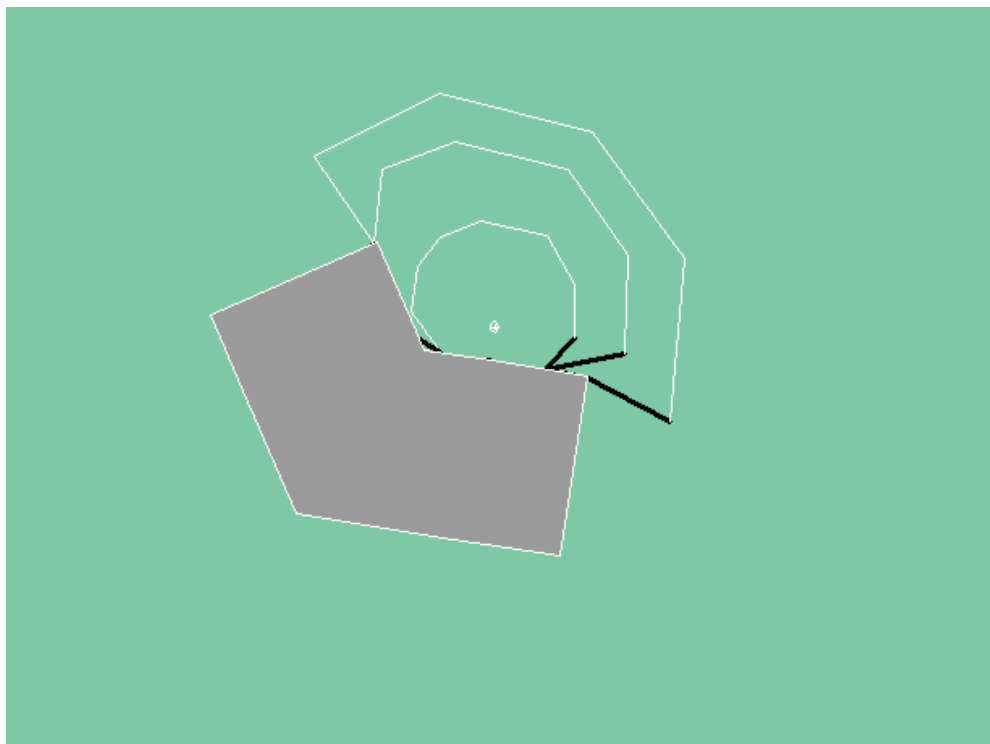
Na figura 4.11 a barreira representa os meios que intervieram no combate ao incêndio, neste caso, meios terrestres de ataque directo, ou seja, um veículo ligeiro e dois veículos pesados. Na simulação o ataque foi feito contra o vento e pode observar-se a redução da extensão do incêndio.



**Figura 4.12 Comparação das áreas ardidas na simulação do incêndio de Ribeira de Frades, com e sem meios de combate.**

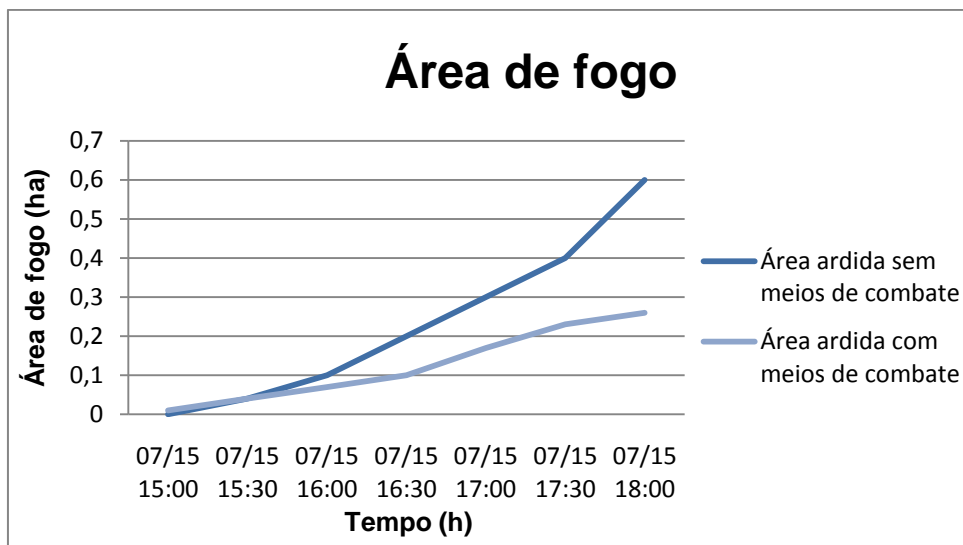
Com a actuação dos meios de combate e quando comparada com a simulação sem os meios de combate a área ardida diminui, contudo, a área ardida estimada é superior à área ardida reportada.

Na figura 4.13 pode observar-se o resultado da simulação do incêndio em Portela do Casal Novo com os meios de combate.



**Figura 4.13 Progressão do incêndio de Portela do Casal Novo, por hora, na área simulada, com a intervenção de meios de combate.**

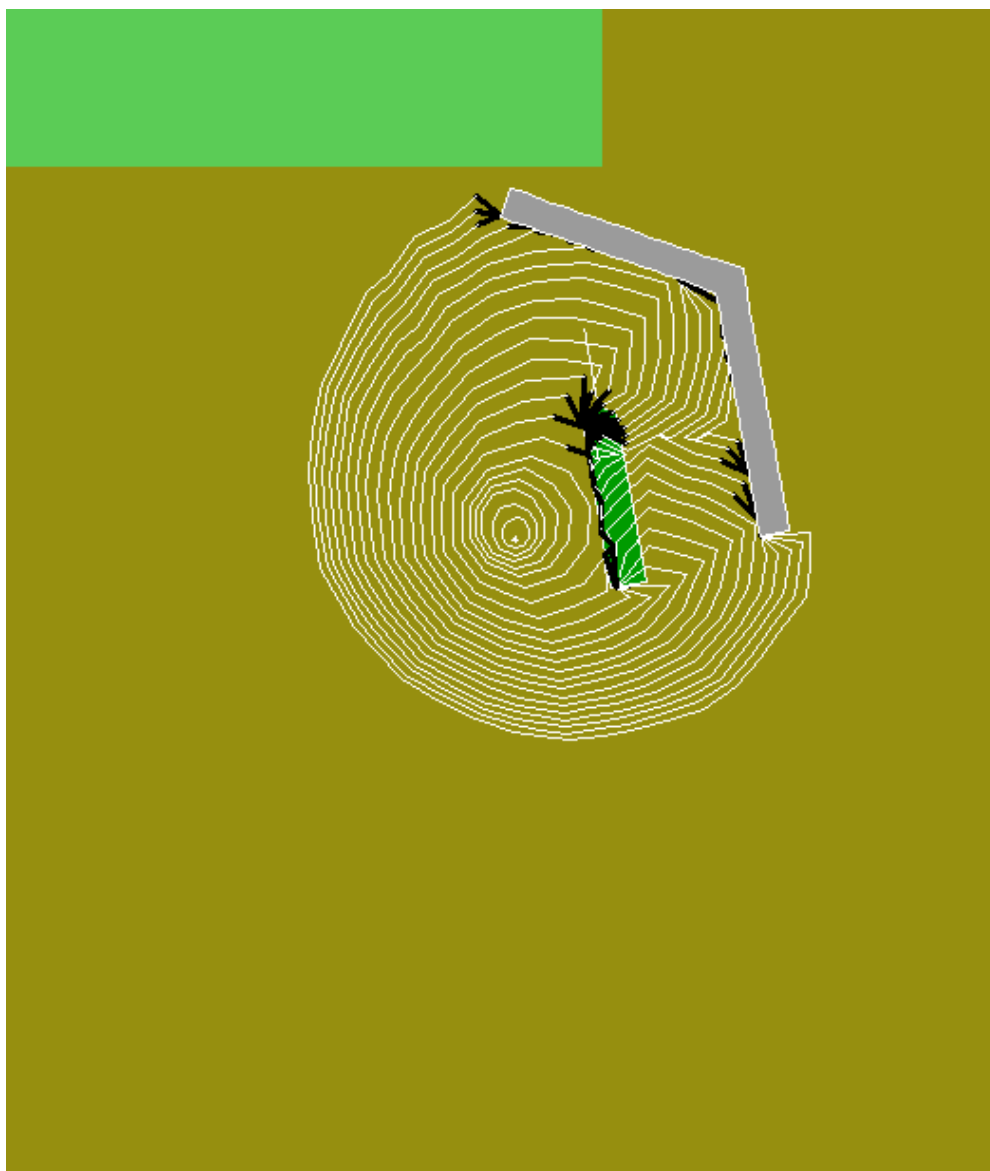
Na figura 4.13 e tal como já foi referido na figura anterior, a barreira representa os meios que intervieram no combate ao incêndio, neste caso, meios terrestres de ataque directo, ou seja, três veículo ligeiro e três veículos pesados. A justificação dada pela corporação de bombeiros para a utilização do elevado número de meios de combate tendo em conta as proporções do incêndio foi o facto de este ter ocorrido numa área de difíceis acessos. Na simulação o ataque foi feito tendo em conta também as condições do terreno, já que estamos perante um terreno de inclinação acentuada.



**Figura 4.14 Comparação das áreas ardidas na simulação do incêndio de Portela do Casal Novo, com e sem meios de combate.**

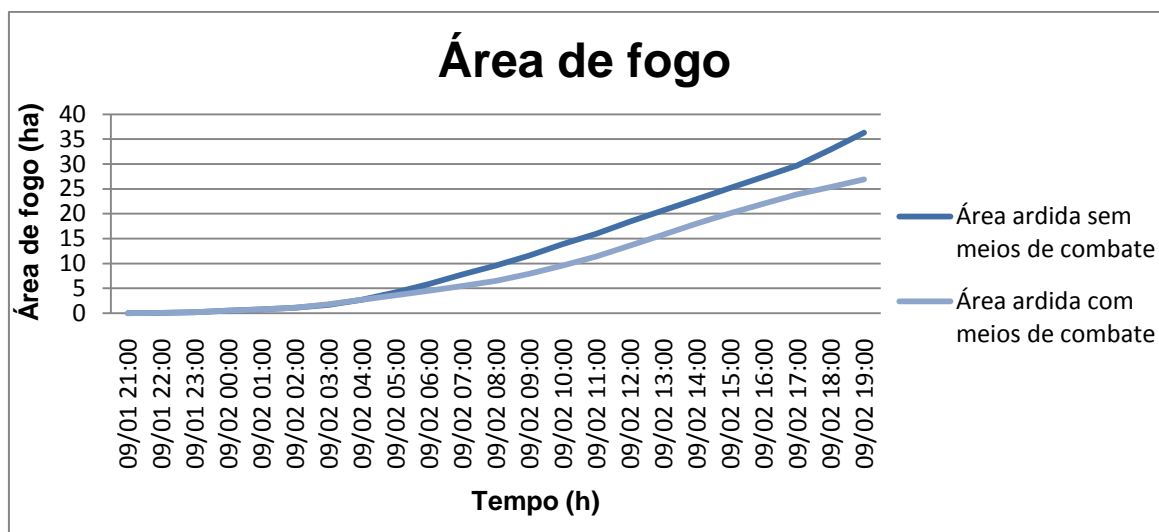
De facto com o elevado número de meios de combate a área ardida diminuiu consideravelmente em relação à simulação sem os meios de combate.

Na simulação de Vila Nova de Poiares (figura 4.15) foi introduzido um meio aéreo, um helicóptero, que na figura se encontra a verde.



**Figura 4.15 Progressão do incêndio, por hora, na área simulada, com a intervenção de meios de combate.**

Na figura 4.15 as barreiras representam os meios de combate que intervieram no combate ao incêndio, neste caso, meios terrestres de ataque directo, ou seja, cinco veículo ligeiro e cinco veículos pesados e meio aéreo, um helicóptero. Como não existe qualquer informação acerca da forma como foi efectuado o ataque optou-se por um ataque contra o vento.



**Figura 4.16 Comparação das áreas ardidas na simulação do incêndio de Vila Nova de Poiares, com e sem meios de combate.**

A área ardida na simulação com os meios de combate (figura 4.16) diminuiu consideravelmente, sendo este valor igual ao da área reportada.

Na tabela 8 compara-se as diferentes áreas ardidas, reportada e na simulação, com e sem meios de combate.

**Tabela 8 Comparação dos resultados.**

| Incêndio              | Área ardida reportada (ha) | Área ardida na simulação sem meios de combate (ha) | Área ardida na simulação com meios de combate (ha) |
|-----------------------|----------------------------|--|--|
| Ribeira de Frades     | 0,5                        | 12,5   | 7,4  |
| Portela do Casal Novo | 0,08                       | 0,5  | 0,3  |
| Vila Nova de Poiares  | 25                         | 49,9   | 25   |

Ao analisar a tabela 8 observa-se que a área ardida estimada pelo modelo é superior á área ardida reportada. A utilização de barreiras, como forma de prevenção da progressão da frente de fogo, parece resultar positivamente uma vez que houve redução da área ardida.

As diferenças nas áreas ardidas poderão estar relacionadas com a cartografia de modelo de combustível e com os dados meteorológicos fornecidos como dados de entrada, que podem introduzir incorrecções grosseiras e condicionar o grau de incerteza. Por outro

lado, a simulação do uso de meios de supressão podem ter provocado alterações ao comportamento do fogo distintas da realidade e, que não são perceptíveis nesta interpretação.



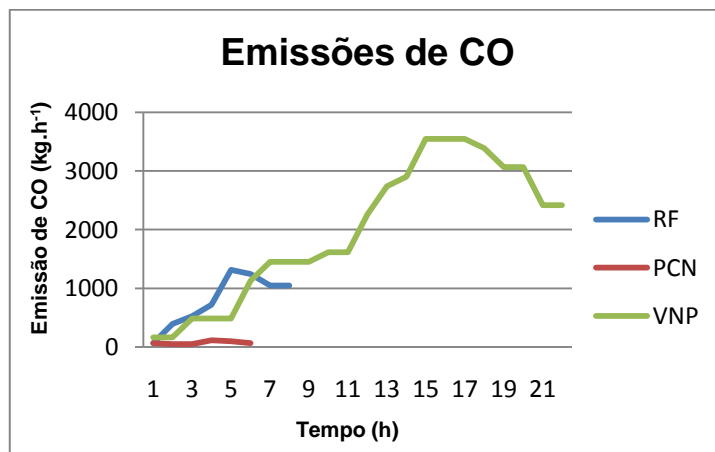


## 5 Cálculo das emissões

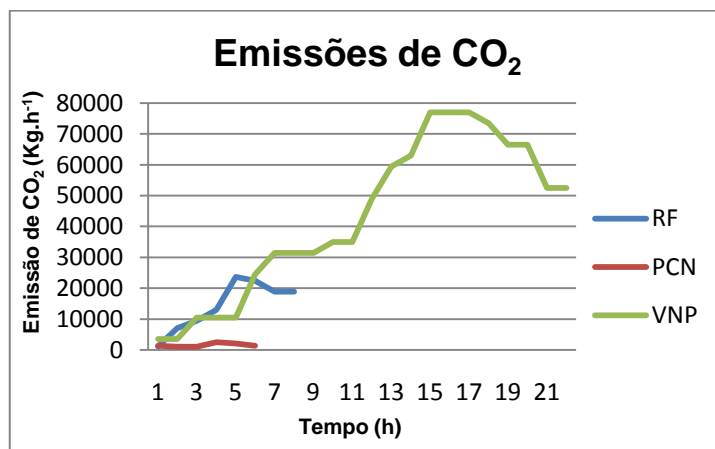
A aplicação da metodologia descrita no capítulo 2 (equação 2.2), permitiu a estimativa dos valores de emissão de CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, HCNM, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> e NO<sub>x</sub> provenientes dos incêndios florestais, expressos em kg poluente.hora<sup>-1</sup> (Anexo D). O modelo FARSITE, não tem a capacidade de efectuar o cálculo das emissões dos incêndios, motivo pelo qual se recorreu a esta metodologia.

Na figura 5.1 apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos poluentes, relativos às ocorrências registadas em Ribeira de Frades, Portela do Casal Novo e Vila Nova de Poiares. As áreas ardidas consideradas foram as obtidas na simulação com os meios de combate, visto que são as que mais se aproximam da realidade.

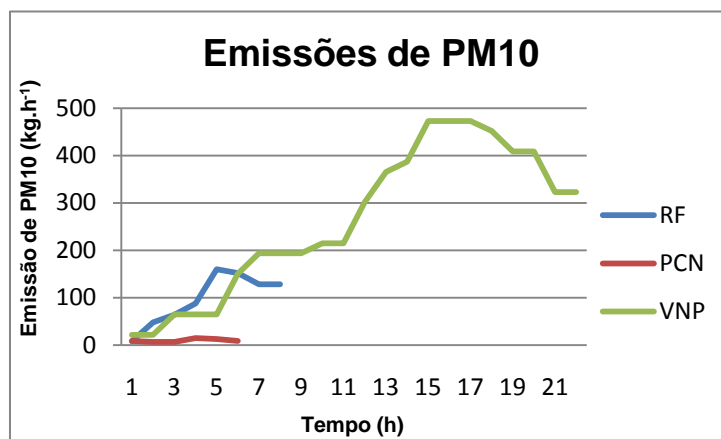
a)



b)



c)



**Figura 5.1 Emissões de CO<sub>2</sub> (a), CO (b) e PM10 (c) estimadas nos três incêndios.**

Legenda:

RF – Ribeira de Frades

PCN – Portela do Casal Novo

VNP – Vila Nova de Poiares

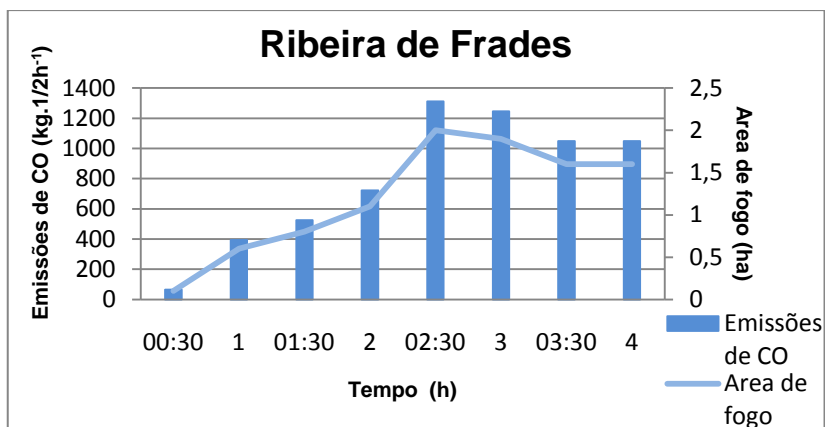
Uma análise comparativa das emissões por poluente (Anexo C) permite constatar que o CO<sub>2</sub> é o que apresenta valores mais elevados, pois resulta directamente da combustão, sendo o seu principal produto final. Segue-se o CO, poluente que decorre da combustão incompleta, com valores uma ordem de grandeza inferior face ao CO<sub>2</sub>. Os restantes poluentes, como as PM10, são emitidos em ordens de grandeza uma ou duas vezes inferiores ao CO.

Quando comparadas as emissões de cada poluente nos três incêndios verifica-se em todos os casos que a taxa de emissão no incêndio de Ribeira de Frades foi a mais elevada, de acordo com o tempo de ocorrência deste, pois o combustível ardido neste incêndio (mato) é um combustível com um factor de emissão muito elevado.

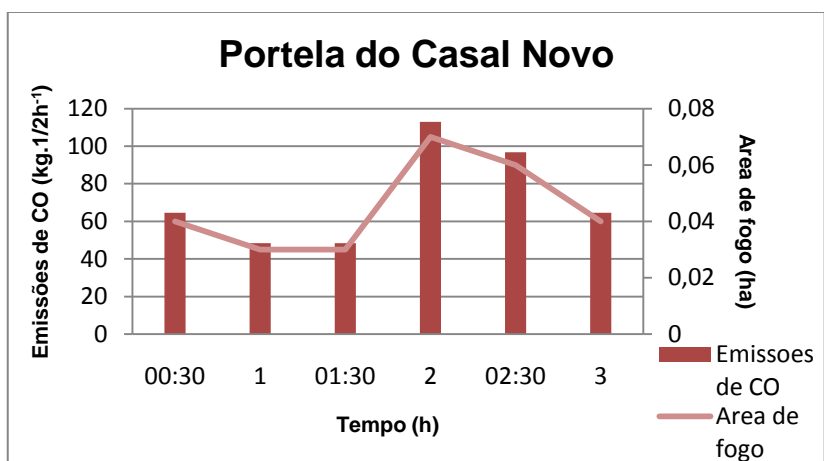
Para uma melhor comparação entre as emissões e a área ardida analisou-se o CO emitido no decorrer de cada incêndio (figura 5.2), pois tendo em conta o estudo do projecto FUMEXP é um poluente altamente tóxico, a exposição a doses relativamente elevadas em pessoas saudáveis pode provocar problemas de visão, redução da capacidade de trabalho, redução da destreza manual, diminuição da capacidade de aprendizagem, dificuldade na resolução de tarefas complexas ou mesmo matar [URL9]. Também se analisaram as PM10 (figuras 5.3) que afectam a saúde e visibilidade

humana. Podem penetrar no aparelho respiratório, provocando inúmeras doenças respiratórias [Borrego, 1995]

a)



b)



c)

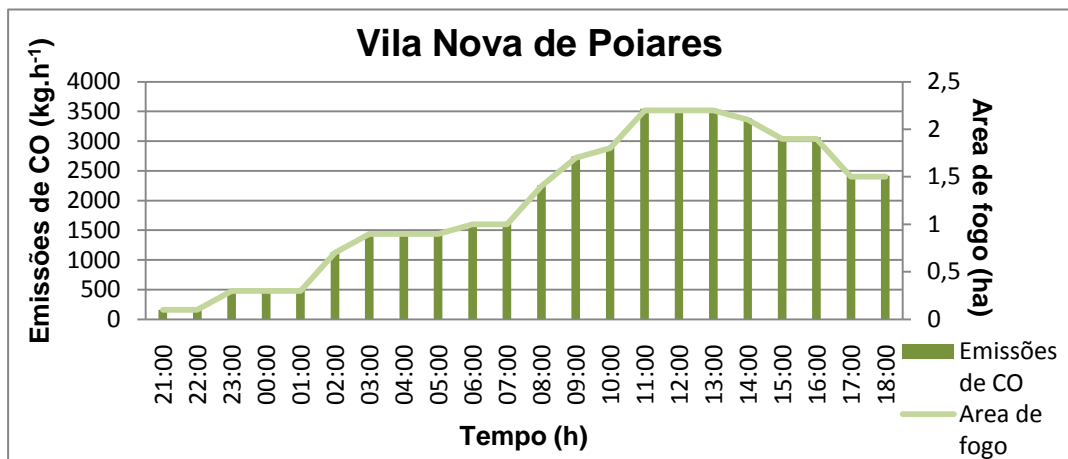
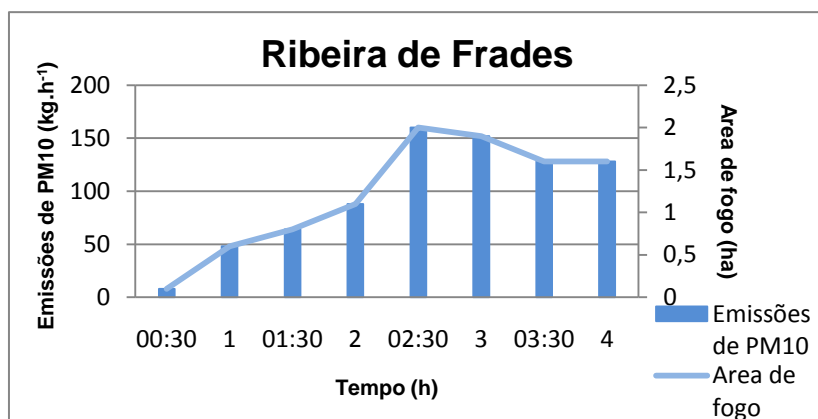
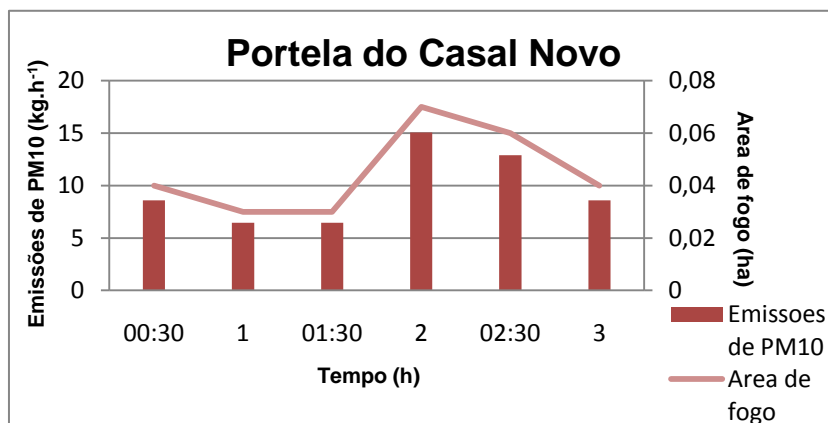


Figura 5.2 Emissões de CO estimadas no incêndio de Ribeira de Frades (a), Portela do Casal Novo (b) e Vila Nova de Poiares (b) e área ardida por hora.

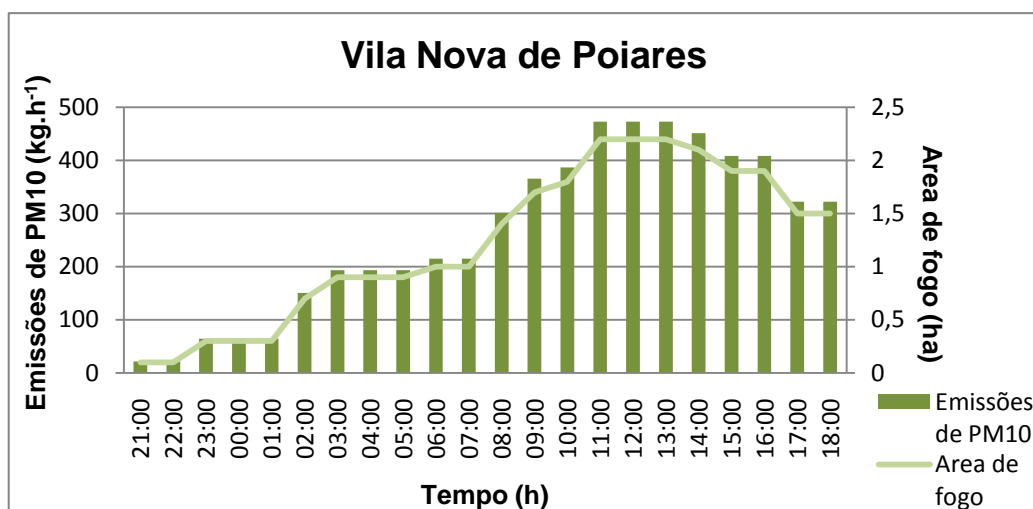
a)



b)



c)



**Figura 5.3 Emissões de PM10 estimadas no incêndio de Ribeira de Frades (a), Portela do Casal Novo (b) e Vila Nova de Poiões (b) e área ardida por hora.**

O cálculo das emissões é um passo fundamental para se poder estimar a quantidade de poluentes a que os bombeiros estão expostos e até que ponto estes podem afectar a sua saúde, o que corresponde, em parte, aos objectivos do projecto FUMEXP.



## 5 Conclusões

O projecto FUMEXP, projecto para o qual esta dissertação ira contribuir com os seus resultados, tem como objectivo analisar o potencial efeito das emissões dos incêndios florestais na saúde dos bombeiros. O estudo é baseado na estimativa da exposição individual dos bombeiros a poluentes atmosféricos através do desenvolvimento e implementação de um procedimento de recolha de dados experimentais, durante os incêndios florestais e os ensaios de queima controlada. Assim o sistema de modelação FARSITE foi o escolhido para simular a progressão de alguns dos incêndios estudados no projecto contribuindo para o cálculo das emissões.

O FARSITE é um modelo que permite o estudo integrado de um incêndio florestal e o melhor planeamento de um fogo, podendo auxiliar no processo de tomada de decisão em acções de combate a fogos e situações de emergência. Abre, também, a possibilidade de criação de cenários de fogos florestais, perto de zonas urbanas e estruturas várias, que permitem a previsão das condições meteorológicas e da área ardida, em que será necessário recorrer a medidas de evacuação ou corte de estradas, de modo a garantir a segurança das populações afectadas.

A aplicação do modelo FARSITE devolveu estimativas relativamente distintas do reportado, que deverão prender-se com incorrecções nos dados de entrada, mas também com a própria estrutura do modelo.

A classificação do uso de solo revelou-se bastante simplista, uma vez que se organiza em categorias pouco diferenciadas e desta forma condicionou a atribuição de modelos de combustível.

As propriedades de cada modelo de combustível (a carga de combustíveis, a razão volume/superfície, profundidade do leito de combustível, humidade de extinção e o calor de combustão do combustível) foram as usadas por defeito pelo modelo, não tendo sido rematadas para as características do caso de estudo.

O recurso a barreiras nas simulações permitiu reduzir de forma aceitável a área ardida. Embora, o cenário que combinava a acção destes meios com os meios de combate não tenha fornecido resultados completamente satisfatórios. Por outro lado, as barreiras construídas são de natureza física, não representando de maneira fiel as barreiras

naturais que se propunham. De facto, na área de simulação o efeito das barreiras parece ser questionável.

O cálculo das emissões baseou-se na aplicação de uma metodologia adaptada às características da floresta portuguesa, em termos de carga combustível e eficiência de combustão, e com factores de emissão dos principais poluentes e áreas ardidas calculadas.

Nas emissões calculadas observou-se que o poluente mais emitido para a atmosfera é  $\text{CO}_2$ , pois resulta directamente da combustão, sendo o seu principal produto final. Segue-se o  $\text{CO}$ , poluente que decorre da combustão incompleta, com valores uma ordem de grandeza inferior face ao  $\text{CO}_2$ , mas que por sua vez tem uma elevada toxicidade, logo é mais prejudicial, assim como as  $\text{PM}_{10}$  que afectam a saúde e a visibilidade humana.

Ao longo deste trabalho procurou-se evidenciar que os incêndios florestais constituem uma fonte de emissão de compostos gasosos e particulados que afectam a saúde humana, em particular dos bombeiros, significativamente expostos no decorrer do seu combate.



## Referências bibliográficas

ANDREAE, M.O. [1991] - **Biomass Burning: Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate.** In Global Biomass Burning. The MIT Press, England. Edited by Joel Levine.

ANDRÉ, J.C.S & VIEGAS, D.X. [2001] - **Modelos de Propagação de Fogos Florestais: Estado-da-Arte para Utilizadores. Parte I: Introdução e Modelos Locais.** Silva Lusitana. Vol 9(2). pp. 237 - 265

ANDRÉ, J.C.S & VIEGAS, D.X. [2002] - **Modelos de Propagação de Fogos Florestais: Estado-da-Arte para Utilizadores. Parte II: Modelos Globais e Sistemas Informáticos.** Silva Lusitana. Vol 10(2).

ANDREWS, P. L. e BEVINO, C. D. [1998] – **Update and expansions of the Behave fire behaviour prediction system.** In 3<sup>rd</sup> International Conference on Forest Fire Research, Luso. Vol. I.

BORREGO, C.; CARVALHO, A. C. & MIRANDA, A. I. [1999] - **Numerical simulation of wind field over complex terrain.** Measuring and Modelling Investigation of Environmental Processes, eds. R. San Jose, WIT Press.

BURGAN, R.E. & ROTHERMEL, R.C. [1984] – **BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system – FUEL subsystem.** Forest Service. Gen. Tec Rep INT-167.

CALOGINE, D., MARGERIT, J., SÈRO-GUILLAUME, O. [1998] - **Characterisation of Vegetation in Forest Fire Models.** III International Conference on Forest Fire Research, 16-20 November 1998, Vol. II .

CARVALHO, A. [2008] - **Os incêndios florestais e a qualidade do ar em cenário de alterações climática.** Tese de Doutoramento em Ciências Aplicadas ao Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Portugal.

COTTRELL W. [1989] - **The book of fire**. Missoula, Mountain Press Publishing Company.

EEA [2004]: **EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook** - 3rd edition, Technical Report nr. 30, European Environment Agency (<http://reports.eea.eu.int/EMEP/CORINAIR4/en/page002.html>).

ICONA. **Defensa Contra Incendios Forestales, Predeccion Y Simulacion Del Comportamiento Del Fuego**. Ministerio de Agricultura Pesca Y Alimentacion.

J. Verde e J. L. Zêzere [2006] - **Artigo VI – Avaliação da perigosidade de incêndio florestal**.

LEVINE, J.S.; COFER III, W.R.; WINSTEAD, E.L.; RHINEHEART, R.P.; CAHOON, D.R., SEBACHER, D.I.; SEBACHER, S. & STOCKS, B.J. [1991] - **Biomass Burning: Combustion Emissions, Satellite Imagery and Biogenic Emissions**. In Global Biomass Burning. The MIT Press, England. Edited by Joel Levine..

LOPES, A.M.G. [2000] - **FireStation user's manual**. Universidade de Coimbra.

LOPES, A.M.G., CRUZ, M.G. e VIEGAS, D.X. [2002] - **FireStation – an integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography**. Environmental Modelling & Software.

MACEDO, F.W. & SARDINHA A. S. [1993a] – **Fogos Florestais**. 1º Volume. Publicações Ciência e Vida. Lisboa.

MACEDO, F.W. & SARDINHA A. S. [1993b] – **Fogos Florestais**. 2º Volume. Publicações Ciência e Vida. Lisboa.

MARTINS, V. [2007] – **Impacto dos Incêndios Florestais na Qualidade do Ar**. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Portugal.

MIRANDA, A.I. [1998] - **Efeito dos Incêndios Florestais na Qualidade do Ar**. Tese de Doutoramento em Ciências Aplicadas ao Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Portugal.

MIRANDA, A.I. & BORREGO, C. [2002] - **Air quality measurements during prescribed fires**. In IV International Conference on Forest Fire Research, Luso, Portugal, 18-23 November 2002 – Forest Fire Research & Wildland Fire Safety, Ed. D. X. Viegas, Millpress, Rotterdam, pp. 205. Proceedings in CD-Rom.

MIRANDA, A.I., COUTINHO, M. E BORREGO C. [1994] - **Forest fire emissions in Portugal: A contribution to global warming?**. Environmental Pollution 83: pp. 121-123

MIRANDA, A.I.; BORREGO, C.; SOUSA, M., VALENTE, J., BARBOSA, P. & CARVALHO, A. [2005] – **Model of Forest Fire Emissions to the Atmosphere**. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. AMB-QA-07/2005. Deliverable D252 of SPREAD Project [EVG1-CT-2001-00043].

MIRANDA, A.I.; BORREGO, C.; AMORIM, J.H.; MARTINS, V.; MARTINS, H.; CARVALHO, A.; SILVA, J.V.; CASCAO, P.; COSTA, A.M.; MONTEIRO, A.; VALENTE, J. & SANTOS, P. [2008] – **Impacto dos Incêndios Florestais na Qualidade do Ar em Áreas Urbanas**. Universidade de Aveiro

NEVES, N. E GEIRINHAS, J. [1999] **USIG: Associação dos utilizadores de Sistemas de Informação Geografica. Dossiers Promocionais**. nº. 1387 (99).

PNAC [2002]: **Programa Nacional para as Alterações Climáticas** - Volume 8: Floresta e Produtos Florestais, Cenário de Referência, Instituto do Ambiente, Portugal.

PASTOR, E.; ZÁRATE, L.; PLANAS, E. & ARNALDOS, J. [2003] – **Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour**. Progress in Energy and Combustion Science. Vol 29. pp. 139 - 153

PERRY, G. [1998] - **Current approaches to modeling the spread of wildland fire: a review**. Progress in Physical Geography. Vol 22(2). pp. 222 - 245

PETERSON, J. & SANDBERG, D. [1988] - **A national PM<sub>10</sub> inventory approach for wildfires and prescribed fires**. In Mathai, C.; Stonefield, D., eds. Transactions; PM10 implementation of standards: an APCA/EPA International Specialty Conference; 23-24 February 1988, San Francisco, CA, Pittsburg, PA: Air Pollution Control Association.

ROTHERMEL, RC. [1972] - **A mathematical model for predicting firespread in wildland fuels**. USDA Forest Service; 1972. ResPap INT-115.

SANDBERG, D.; OTTMAR, R.; PETERSON, J. & CORE, J. [2002] - **Wildland fire on ecosystems: effects of fire on air**. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 5. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

VALENTE, J. [2005] – **Modelação do Fogo Florestal e dos seus Impactes na Qualidade do Ar**. Tese de Mestrado em Poluição Atmosférica. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Portugal.

VIEGAS, D.X. [1989] - **Manual sobre Incêndios Florestais; Secretaria-Geral do Ministério do Planeamento e da Administração do Território**, Lisboa.

VIEGAS, D.X. [1993] - **Fire Behaviour and Fireline Safety**. Ann. Medit. Burns Club. Vol 6 (3).

VIEGAS, D. X. [1996] - **Forest Fire Behaviour Modelling and testing**. Coimbra.

VIEGAS, D.X. [2006] - **Modelação do Comportamento do Fogo. In Incêndios florestais em Portugal: caracterização, impactes e prevenção**. Ed: Pereira, J.S., Pereira, J.M.C., Rego, F.C., Silva, J.M.N. e Silva, T.P. ISA Press, Lisboa, Portugal.

WHO/UNEP/WMO [1999] - **Health Guidelines for Vegetation Fire Events - Guideline Document**. Schwela D., Goldammer J.G., Morawska L., Simpson O. [Eds.]. United Nations Environment Programme, Nairobi, World Health Organization, Geneva, World Meteorological Organization, Geneva, Institute of Environmental Epidemiology, WHO Collaborating Centre for Environmental Epidemiology, Ministry of the Environment, Singapore.

WIEDINMYERA, C., QUAYLEB, B., GERONC, C., BELOTEA, A., MCKENZIED, D., ZHANGE, X., O'NEILLF, S. E WYNNE, K.K. (2006): **Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling**. Atmospheric Environment 40 (2006)

WINSTEAD, E.L.; COFER III, W.R. & LEVINE, J.S. [1991] - **Emissions of nitrous oxide from biomass burning**. In Global Biomass Burning. The MIT Press, England. Edited by Joel Levine.

**Endereços da Internet:**

[URL1] [www2.dao.ua.pt/gemac/](http://www2.dao.ua.pt/gemac/)

[URL2] [www.afn.min-agricultura.pt](http://www.afn.min-agricultura.pt)

[URL3] [commons.wikimedia.org](http://commons.wikimedia.org)

[URL4] [www.ambiente.maiadigital.pt](http://www.ambiente.maiadigital.pt)

[URL5] [firemodels.fire.org](http://firemodels.fire.org)

[URL6] [www.igeo.pt/gdr/projectos/clc2006/](http://www.igeo.pt/gdr/projectos/clc2006/)

[URL7] [snirh.pt](http://snirh.pt)

[URL8] [www.iambiente.pt](http://www.iambiente.pt)

[URL9] [pt.wikipedia.org](http://pt.wikipedia.org)



# **Anexos**

Anexo A – Diferentes modelos de propagação de fogos

Anexo B – Dados de entrada do FARSITE

Anexo C – Meios de combate aplicados no FARSITE

Anexo D – Resultados das emissões de diferentes poluentes





# Anexo A – Modelos de propagação de fogos

Tabela 9 Características dos diferentes modelos de propagação de fogos.

| Modelo              | Características   | Dados de entrada  | Vantagens   | Desvantagens  |
|---------------------|---|---|---|---|
| <b>BehavePlus</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo semi-empírico</li> <li>- Sistema de modelação de fogo, é um programa que trabalha com vários modelos que descrevem o comportamento do fogo</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo de combustível</li> <li>- Humidade</li> <li>- Velocidade do vento</li> <li>- Inclinação do terreno</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gera tabelas, gráficos e diagramas simples e pode ser usado para uma infinidade de aplicações de gestão do fogo</li> </ul> | -   |
| <b>FARSITE</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo semi-empírico</li> <li>- Simulador de propagação de um fogo</li> <li>- Tem que utilizar um SIG, pois requer informações espaciais</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Topografia</li> <li>- Combustíveis</li> <li>- Clima</li> <li>- Comportamento do vento.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Representa a área ardida</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Apenas os utilizadores com formação adequada e experiência do comportamento do fogo devem aplicar FARSITE</li> </ul> |
| <b>FIRESTAR-2.0</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo físico</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propriedades físicas</li> <li>- Teor de humidade da vegetação</li> <li>- Condições de fluxo externo</li> <li>- Declive do terreno</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Eficaz na linha de fogo</li> <li>- Intensidade avaliada a partir do consumo real</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Não se encontra disponível para acesso livre</li> </ul>  |

|                                       |   |  |   |  |
|---------------------------------------|---|--|---|--|
| <b>FIREREGIME-<br/>1.0</b>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propagação do fogo: probabilística, influenciada pela carga de combustível da célula e meteorologia</li> <li>- Dinâmica da vegetação: aumento linear da carga de combustível até o máximo ser atingido</li> <li>- Resolução espacial: 1 ha</li> <li>- Resolução temporal: 1 ano</li> </ul> | Nenhum. Assume-se vários cenários prováveis para a meteorologia e vegetação das regiões mediterrânicas   | <p>O modelo fornece-nos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- O número de incêndios por ano (total e por classe de tamanho de incêndio)</li> <li>- Área queimada por ano (total e por classe de tamanho de incêndio)</li> <li>- Área queimada por ano em incêndios controlados</li> </ul> | - Não se encontra disponível para acesso livre |
| <b>SPREAD<br/>SECTION2<br/>WP 2.1</b> | - Modelo físico   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propriedades físicas</li> <li>- Teor de humidade da vegetação</li> <li>- Condições de fluxo externo (velocidade do vento antes da ignição do fogo, teor de humidade do ar, temperatura do ar ambiente)</li> <li>- Declive do terreno</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Eficaz linha de fogo.</li> <li>- Intensidade avaliada a partir do consumo real.</li> <li>- Chama bem definida (contorno, altura)</li> </ul>  | - Não se encontra disponível para acesso livre |
| <b>SPREAD<br/>SECTION2<br/>WP 2.1</b> | - Modelo de reacção-difusão   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- A distribuição espacial da vegetação</li> <li>- Humidade</li> <li>- Condições de fluxo externo (velocidade do vento antes da ignição do fogo, teor de humidade do ar, temperatura</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Eficaz linha de fogo</li> <li>- Intensidade avaliada a partir do consumo real de combustível</li> </ul>  | - Não se encontra disponível para acesso livre |

|                                       |   |  |   |  |
|---------------------------------------|---|--|---|--|
|                                       |   | do ar ambiente)<br>- Terreno   |   |  |
| <b>FIRESTATION</b>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propagação do fogo e simulação de campo de vento</li> <li>- Semi abordagem empírica.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Características do terreno</li> <li>- Velocidade e direcção do vento</li> <li>- Características do combustível</li> </ul>   | - | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Não se encontra disponível para acesso livre</li> </ul> |
| <b>FIRE LINE ROTATION MODEL (FRM)</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Semi-empírico</li> <li>- Este modelo está a ser desenvolvido para incorporar as condições arbitrarias de vento e inclinação, bem como arbitrária no terreno e as mudanças de combustível.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inclinação do terreno;</li> <li>- Velocidade de fluxo do vento;</li> <li>- Taxa básica de propagação do leito de combustível</li> </ul>   | - | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Não se encontra disponível para acesso livre</li> </ul> |
| <b>INCENDIU 1.0</b>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo de reacção-difusão</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Distribuição espacial da vegetação</li> <li>- Humidade</li> <li>- Condições de fluxo externo (velocidade do vento antes de ignição, temperatura do ar ambiente)</li> <li>- combustível</li> </ul> | - | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Não se encontra disponível para acesso livre</li> </ul> |
| <b>SPREAD 1.0</b>                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo físico</li> <li>- Estima a altura das chamas sem vento e o perfil vertical da radiação das chamas.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Combustível</li> <li>- Temperatura do ar, velocidade do vento e inclinação</li> </ul>   | - | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Não se encontra disponível para acesso livre</li> </ul> |



## Anexo B – Dados de entrada do FARSITE

Tabela 10a Atribuição de um modelo de combustível a cada tipo de uso de solo.

| Tipo de uso do solo | Uso do solo                                      | Código | Modelo de Combustível | Tipo de combustível                      |
|---------------------|--|--------|-----------------------|--|
| Tecido Urbano       | Tecido urbano contínuo                           | UU1    | 0                     | Incombustível                            |
|                     | Tecido urbano descontínuo                        | UU2    | 0                     | Incombustível                            |
|                     | Outros espaços fora do tecido urbano consolidado | UU9    | 0                     | Incombustível                            |
|                     | Zonas industriais e comerciais                   | SW1    | 0                     | Incombustível                            |
|                     | Vias de comunicação (rodoviárias e ferroviárias) | SW2    | 0                     | Incombustível                            |
|                     | Outras infra-estruturas e equipamentos           | SW9    | 0                     | Incombustível                            |
|                     | Pedreiras, saibreiras, minas a céu aberto        | JJ1    | 0                     | Incombustível                            |
|                     | Outras áreas degradadas                          | JJ9    | 0                     | Incombustível                            |
| Espaços verdes      | Espaços verdes urbanos (florestais)              | SL1    | 0                     | Incombustível                            |
| Culturas            | Sequeiro   | CC1    | 3                     | Pasto espesso, alto                      |
|                     | Regadio  | CC2    | 0                     | Incombustível                            |
|                     | Outros (estufas, viveiros, etc.)                 | CC9    | 0                     | Incombustível                            |
| Vinhas              | Vinha  | VV1    | 5                     | Mato denso, com carga ligeira de folhada |
|                     | Vinha+cultura anual                              | VC1    | 5                     | Mato denso, com carga ligeira de folhada |
| Pomares             | Citrinos   | AA1    | 8                     | Bosque denso                             |
|                     | Outros pomares                                   | AA9    | 8                     | Bosque denso                             |
|                     | Mistos de pomares                                | AAx    | 8                     | Bosque denso                             |
|                     | Pomar + Culturas anual                           | ACx    | 8                     | Bosque denso                             |
| Olival              | Olival + Cultura anual                           | OC1    | 6                     | Mato denso com carga média de folhada    |

|                              |   |     |   |  |
|------------------------------|---|-----|---|--|
| Áreas agrícolas heterogêneas | Culturas anuais + Vinha   | CV1 | 2 | Pasto fino com mato                    |
|                              | Culturas anuais + Vinha   | CV2 | 2 | Pasto fino com mato                    |
|                              | Culturas anuais + Pomar   | CA1 | 2 | Pasto fino com mato                    |
|                              | Culturas anuais + Pomar   | CA2 | 2 | Pasto fino com mato                    |
|                              | Culturas anuais + Olival  | CO1 | 2 | Pasto fino com mato                    |
|                              | Culturas anuais + Olival  | CO2 | 2 | Pasto fino com mato                    |
|                              | Sistemas culturais e parcelares complexos                       | CX1 | 1 | Pasto fino                             |
|                              | Áreas principalmente agrícolas com espaços naturais importantes | CI0 | 6 | Mato denso, com carga média de folhada |

**Tabela 10b Atribuição de um modelo de combustível a cada uso de solo.**

| Tipo de uso do solo         | Uso do solo                         | Código | Modelo de Combustível | Tipo de combustível          |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------|-----------------------|------------------------------|
| Territórios agro-florestais | Culturas anuais + Espécie florestal | CF0    | 2                     | Pasto fino com mato          |
|                             | Culturas anuais + Espécie florestal | CF1    | 2                     | Pasto fino com mato          |
|                             | Culturas anuais + Espécie florestal | CF2    | 2                     | Pasto fino com mato          |
| Floresta                    | Castanheiro manso                   | NN+_   | 10                    | Bosque com sub-bosque pesado |
|                             | Carvalho                            | QQ+_   | 10                    | Bosque com sub-bosque pesado |
|                             | Eucalipto                           | EE+_   | 10                    | Bosque com sub-bosque pesado |
|                             | Outras folhosas                     | FF+_   | 10                    | Bosque com sub-bosque pesado |
|                             | Pinheiro bravo                      | PP+_   | 7                     | Mato muito inflamável        |
| Povoamento florestal misto  | Carvalho e Pinheiro                 | QP+_   | 8                     | Bosque denso                 |
|                             | Carvalho e Eucalipto                | QF+_   | 10                    | Bosque com sub-bosque pesado |
|                             | Eucalipto e Pinheiro                | EP+_   | 9                     | Bosque relativamente denso   |
|                             | Folhosas e Pinheiro                 | FP+_   | 8                     | Bosque denso                 |
|                             | Folhosas e Eucalipto                | FE+_   | 10                    | Bosque com sub-bosque pesado |

|                      |   |      |    |  |
|----------------------|---|------|----|--|
|                      | Eucalipto e outras folhosas                                   | EF+_ | 10 | Bosque com sub-bosque pesado           |
|                      | Pinheiro e Folhosas   | PF+_ | 9  | Bosque relativamente denso             |
|                      | Pinheiro e Carvalho   | PQ+_ | 9  | Bosque relativamente denso             |
|                      | Pinheiro e Eucalipto  | PE+_ | 9  | Bosque relativamente denso             |
| Meios semi-naturais  | Vegetação esclerofítica - carrascal                           | II0  | 4  | Mato maduro                            |
|                      | Pastagens naturais pobres                                     | II1  | 1  | Pasto fino                             |
|                      | Vegetação arbustiva baixa - matos                             | II2  | 1  | Pasto fino                             |
|                      | Vegetação arbustiva alta e floresta degradada ou de transição | IP0  | 6  | Mato denso, com carga média de folhada |
|                      | Vegetação arbustiva alta e floresta degradada ou de transição | IE0  | 6  | Mato denso, com carga média de folhada |
|                      | Vegetação arbustiva alta e floresta degradada ou de transição | IF0  | 6  | Mato denso, com carga média de folhada |
|                      | Áreas descobertas sem ou com pouca vegetação                  | JP0  | 0  | Incombustível                          |
|                      | Praias, dunas, areais e solos sem cobertura vegetal           | JY1  | 0  | Incombustível                          |
|                      | Rocha nua   | JY2  | 0  | Incombustível                          |
| Superfícies com água | Cursos de água  | HH1  | 0  | Incombustível                          |
|                      | Lagoas e albufeiras   | HH2  | 0  | Incombustível                          |

Programmer's Editor 1.0.1.8 : [C:\Users\Ana\Desktop\farosite\farosite\_PCN\ash\_elevação.asc]

File Edit Setting Windows Tools Language Help

68HC11 assembler

ash\_elevação.asc

```
1 hcols 40
2 nrows 30
3 xllcorner 157819.328125
4 yllcorner 384678.625
5 cellsize 5
6 NODATA_value -9999
7 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
8 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
9 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
10 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
11 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
12 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
13 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
14 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
15 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
16 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
17 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
18 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
19 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
20 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
21 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
22 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
23 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
24 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
25 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
26 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
27 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
28 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
29 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
30 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
31 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
32 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
33 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
34 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
35 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
36 105 105 105 105 105 105 108 108 105 105 105 103 103 102 102 101 100 100 100 98 98 98 95 95 90 88 86 85 83 80 80 80 80 78 76 74 70 70
```

Figura B.0.1 Ficheiro de entrada, elevação em Portela do Casal Novo



## Anexo C – Meios de combate aplicados no FARSITE

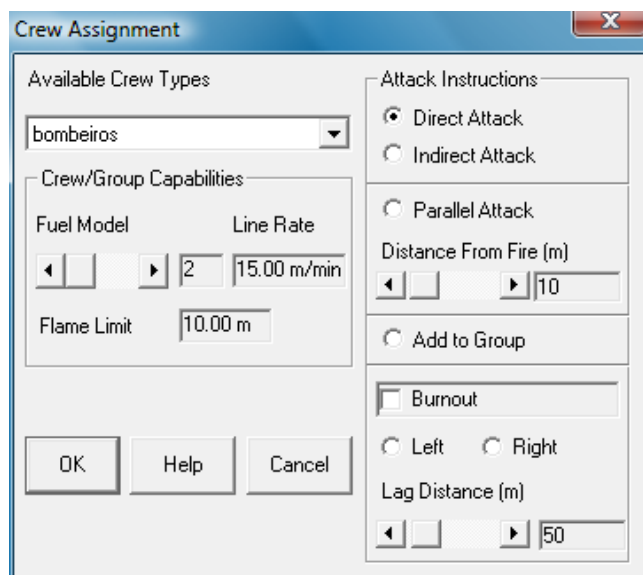


Figura C.1 Ficheiro que permite definir o tipo de ataque a utilizar.

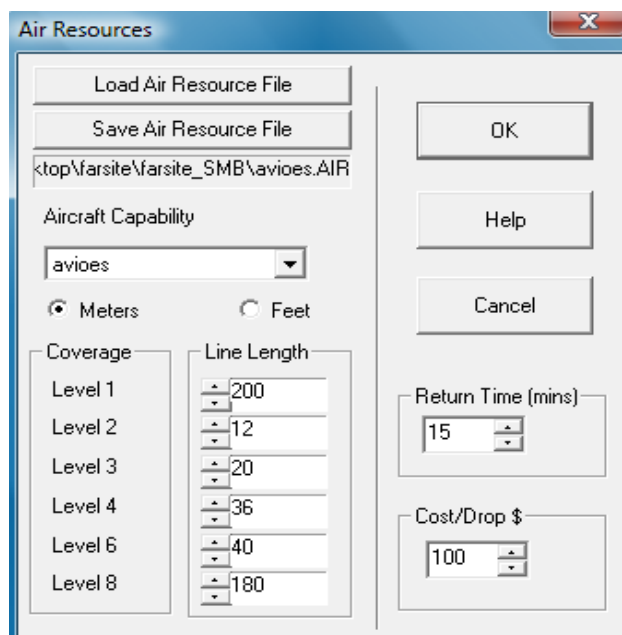
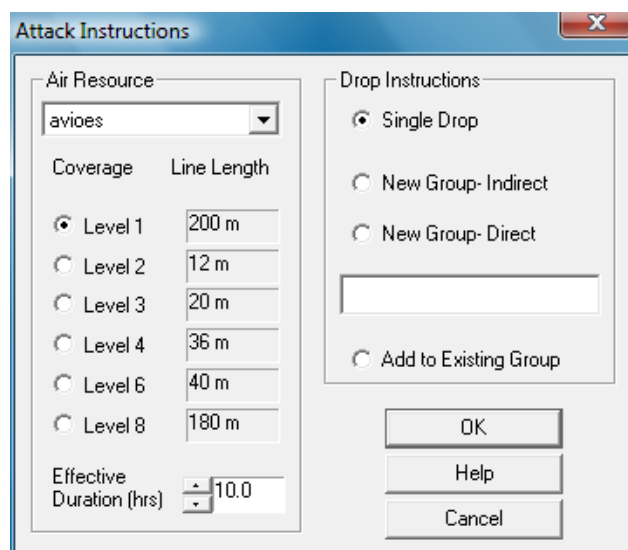


Figura C.2 Ficheiro criado para definir os meios aéreos.



The image shows a software dialog box titled "Attack Instructions". It is divided into two main sections: "Air Resource" and "Drop Instructions".

**Air Resource Section:**

- A dropdown menu labeled "Air Resource" currently shows "avioes".
- A table with two columns: "Coverage" and "Line Length".
- Under "Coverage", there are radio buttons for "Level 1", "Level 2", "Level 3", "Level 4", "Level 6", and "Level 8". "Level 1" is selected.
- Under "Line Length", there are text input fields corresponding to each level: "200 m", "12 m", "20 m", "36 m", "40 m", and "180 m".
- At the bottom, there is a label "Effective Duration (hrs)" followed by a spinner box set to "10.0".

**Drop Instructions Section:**

- Radio buttons for "Single Drop", "New Group- Indirect", "New Group- Direct", and "Add to Existing Group". "Single Drop" is selected.
- A text input field is located below the "New Group- Indirect" and "New Group- Direct" options.
- At the bottom are three buttons: "OK", "Help", and "Cancel".

**Figura C.3** Ficheiro que define o tipo de ataque aéreo.

## Anexo D – Resultados das emissões de diferentes poluentes

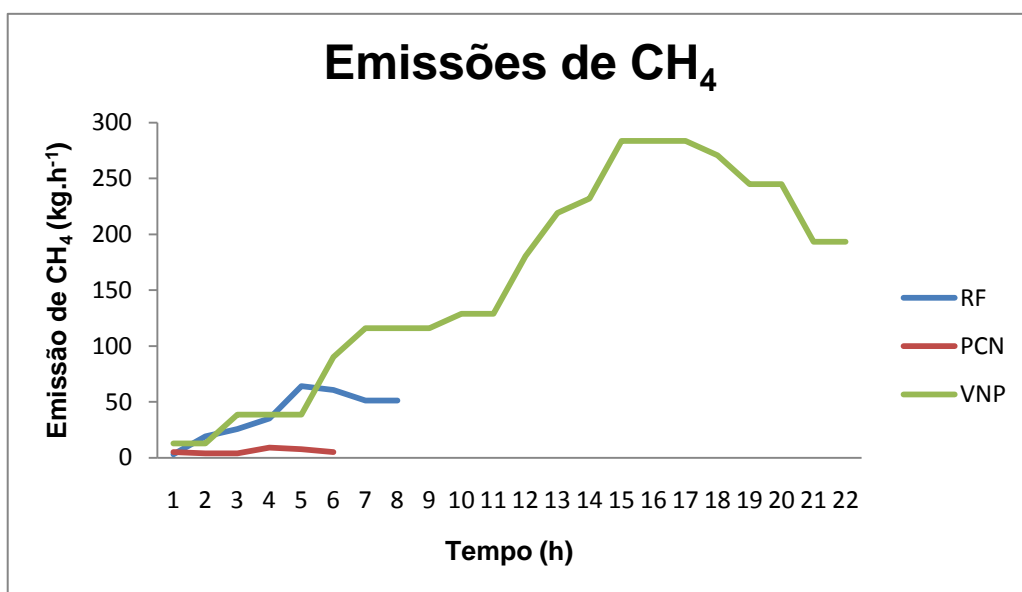


Figura D.0.1 Emissões de CH<sub>4</sub> simuladas nos três incêndios.

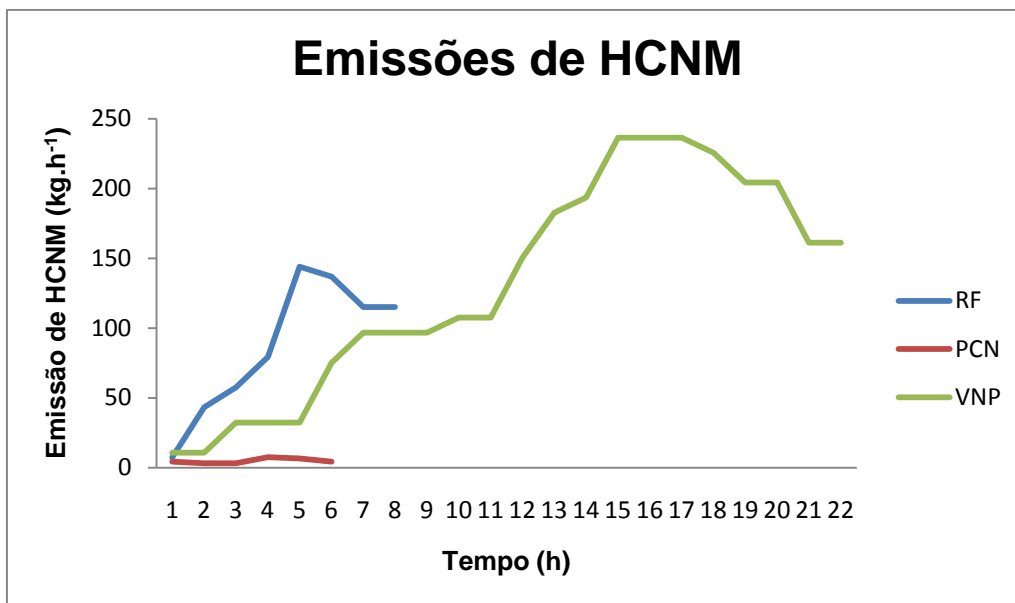


Figura D.0.2 Emissões de HCNM simuladas nos três incêndios.

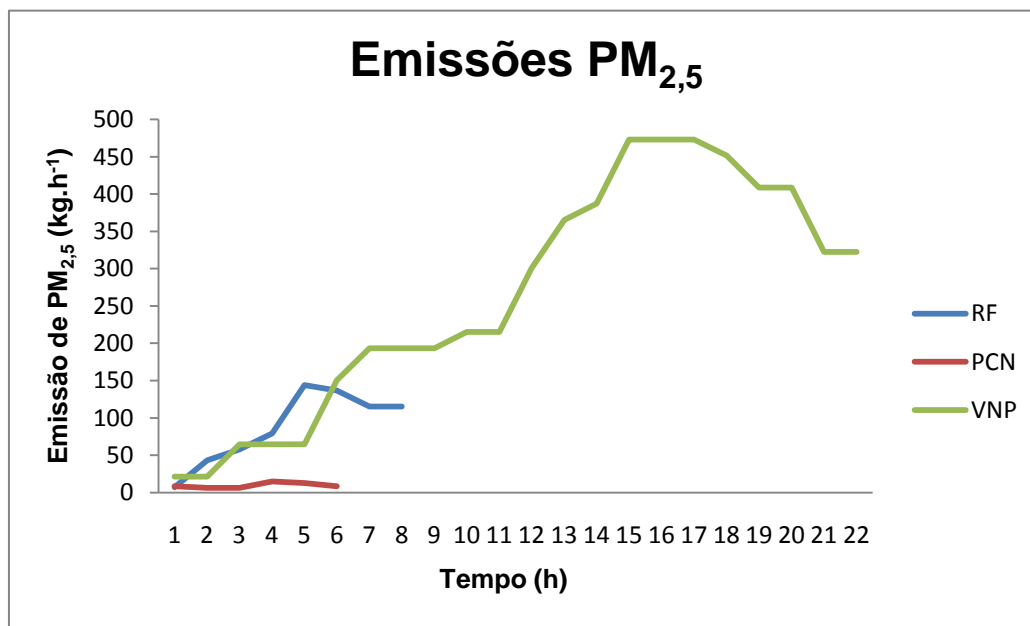


Figura D.0.3 Emissões de PM<sub>2,5</sub> simuladas nos três incêndios.

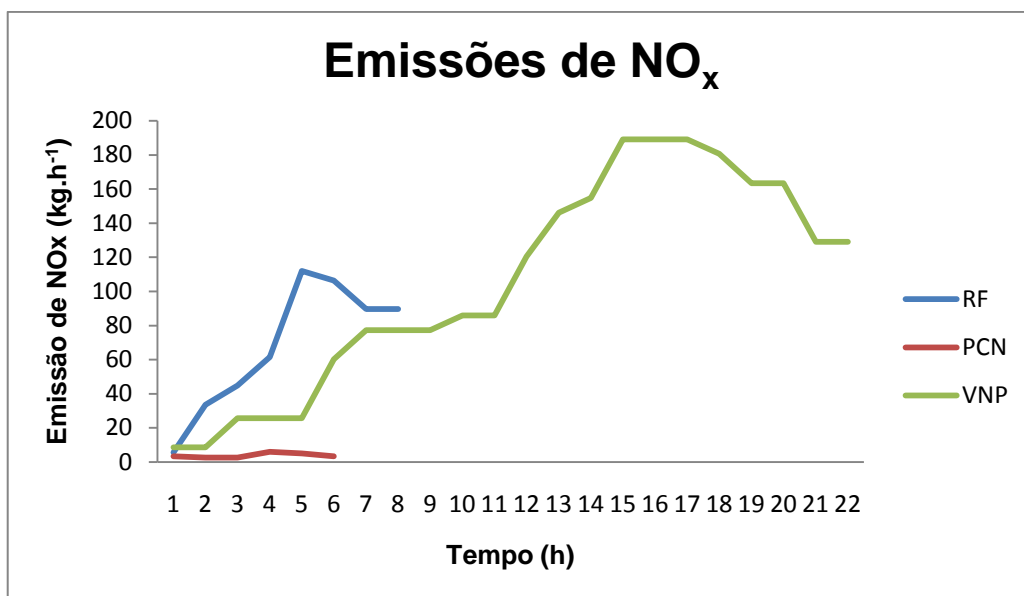


Figura D.0.4 Emissões de NO<sub>x</sub> simuladas nos três incêndios.

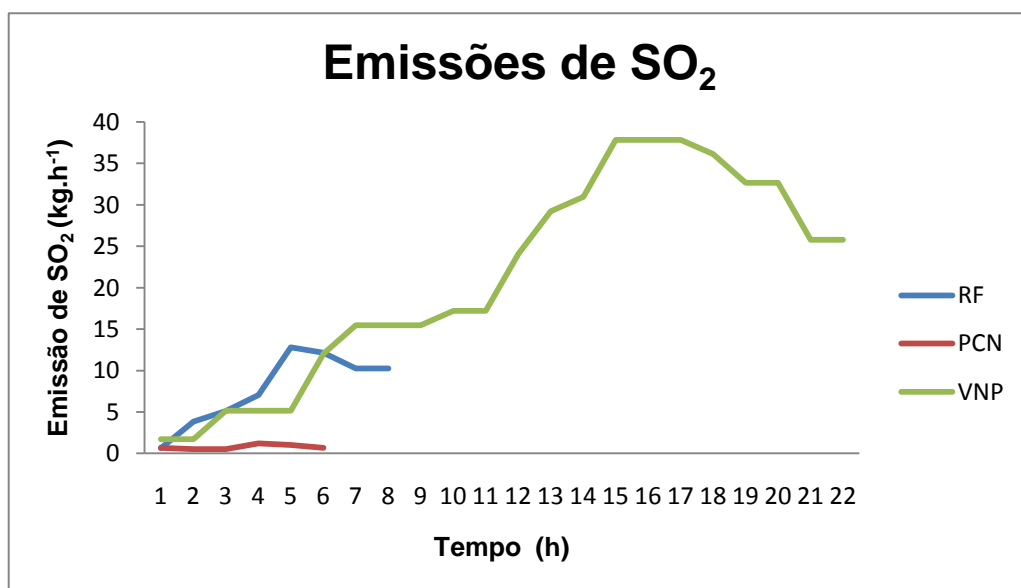


Figura D.0.5 Emissões de SO<sub>2</sub> simuladas nos três incêndios.

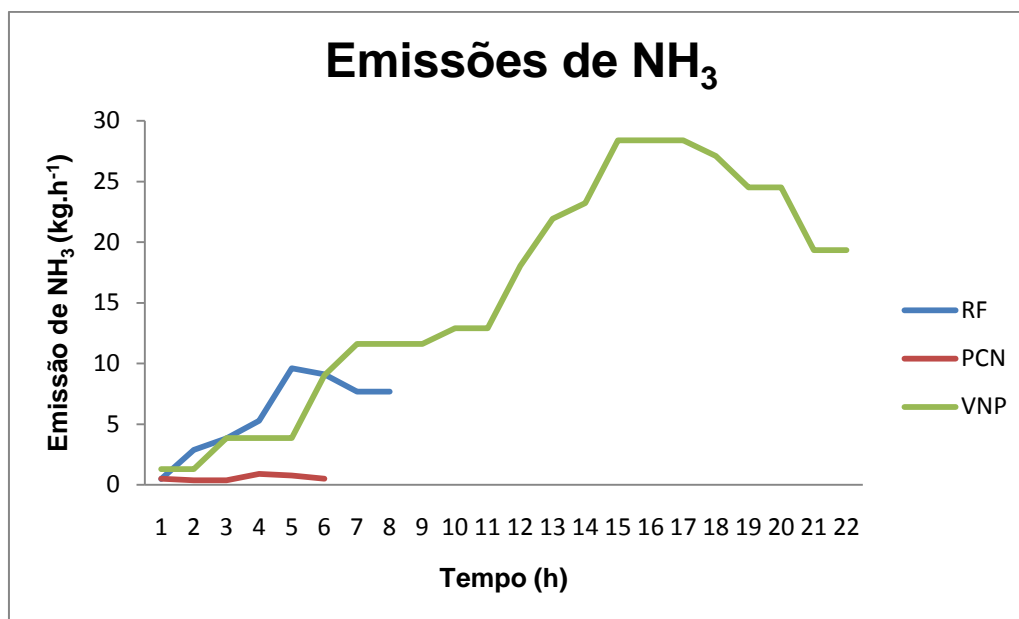


Figura D.0.6 Emissões de NH<sub>3</sub> simuladas nos três incêndios.